



**Danta Marizane
Rosse**

**Processamento e Interpretação de Dados
Aerogeofísicos da Província de Cabo Delgado em
Moçambique**



**Danta Marizane
Rosse**

**Processamento e Interpretação de Dados
Aerogeofísicos de Cabo Delgado em Moçambique**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Geomateriais e Recursos Geológicos, realizada sob a orientação científica do Prof. Dr. Manuel João Senos Matias e do Prof. Dr. Eduardo Anselmo Ferreira da Silva, Professores Catedráticos do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho à minha esposa e filhos pelo incansável apoio.

O júri

Presidente

Jorge Manuel Pessoa Girão Medina

Prof. Auxiliar no Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

Manuel João Senos Matias

Prof. Catedrático no Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

Eduardo Anselmo Ferreira da Silva

Prof. Catedrático no Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

Fernando Pedro Ortega de Oliveira Figueiredo

Prof. Auxiliar no Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra

Agradecimentos

De entre as pessoas que me apoiaram, cabe me destacar aquelas que mais directamente partilharam comigo a execução deste trabalho, mas peço desde já as minhas sinceras desculpas aos que inconscientemente poderão ser omissos nesta lista.

Ao Instituto Português de Apoio ao Desenvolvimento - IPAD, que subsidiou este trabalho, através de uma bolsa de Mestrado, no âmbito de Cooperação com o Ministério da Educação e Cultura de Moçambique.

Ao Doutor Manuel João Senos Matias, por ter assumido a orientação científica e pelo apoio moral, paciência e compreensão demonstrado ao longo da execução do trabalho, muito obrigado.

A Direcção Nacional de Geologia de Moçambique, por ter me cedido os dados aerogeofísicos para este estudo.

Muito obrigado aos Doutores Eduardo Anselmo Ferreira da Silva e José Francisco Horta dos Santos que activamente acompanharam a fase de candidatura ao Mestrado de Geomateriais e Recursos Geológicos.

Ao Doutor Alexandre Martins Campos de Lima pelo seu ensinamento, simpatia o meu muito obrigado.

Ao Mestre Carlos Miguel da Silva Grangeia, que sempre se disponibilizou para responder as minhas questões relacionadas com SIG.

Aos Professores: Fernando Joaquim Fernandes Tavares Rocha, Amália Paula Martins Martinho Dias dos Reis, António José Guerner Dias, Iuliu Bobos Radu, João Manuel Domingues Coelho, Maria Manuela Coelho Marques e Manuel Serrano Pinto. Muito obrigado pelo vosso apoio moral e científico.

À secretaria do Departamento de Geociências (UA), da UP e Gabinete de Relações Internacionais (UA), à D. Maria da Graça, Paula Cruz o meu muito obrigado pelo vosso apoio.

Por último, uma palavra de profundo e sincero agradecimento a todos quanto colaboraram ou contribuíram para a realização deste Mestrado, espero que se sintam compensados por saberem que só com a vossa colaboração este trabalho se tornou possível.

Palavras-chave

Dados aerogeofísicos, magnéticos, radiométricos, deconvolução *Euler*, processamento de dados, interpretação, Moçambique.

Resumo

O objectivo geral desta dissertação é processamento e interpretação dos dados aerogeofísicos (magnéticos e radiométricos) utilizando como suporte o Programa Oasis montaj da Geosoft. A área de estudo localiza-se na província de Cabo Delgado em Moçambique. Os métodos *Bi-directional Line Gridding* e Minimum Curvature foram usados na elaboração de mapas geofísicos. O método *Bi-directional Line Gridding* mostrou bons resultados para os dados magnéticos enquanto o método Minimum Curvature mostrou ser mais adequado para a análise dos dados radiométricos. Com base na informação disponível foram elaborados mapas magnéticos (campo magnético anómalo, primeira derivada vertical, redução ao pólo e sinal analítico) e radiométricos (K, Th, U, Tc, ternário *RGB*, *CMY*). Tendo como suporte as imagens do *Google* da área de estudo, e recorrendo-se aos programas ArcGIS 9.2 e *Adobe Photoshop 7.0*, foi elaborado o mosaico que depois foi integrado com os mapas geofísicos permitindo uma boa combinação entre estes dois grupos de dados. Com base nos produtos de processamento foi possível definir os grandes domínios magnéticos, estruturas geológicas e limites entre as unidades radiométricas. Para estimar as profundidades das fontes das anomalias foram produzidos mapas de soluções usando a técnica de Deconvolução *Euler*, tendo mostrado bons resultados. Para auxiliar a interpretação foram traçados dez perfis sobre o mapa do campo magnético anómalo.

Keywords

Airborne geophysics, magnetic, radiometric, Euler Deconvolution, data processing, interpretation, Mozambique.

Abstract

The general objective of this dissertation is processing and interpretation of the airborne geophysics data (magnetic and radiometric) using as support the Program Oasis montaj of Geosoft. The study area is located in Cabo Delgado's province in Mozambique. The methods Bi-directional Line Gridding and Minimum Curvature were used in the elaboration of geophysical maps. The method Bi-directional Line Gridding showed good results for the magnetic data while the method Minimum Curvature showed to be more appropriate for the analysis of the radiometric data. With base in the available information magnetic (field magnetic field anomaly, first vertical derivative, reduction to the pole and analytical signal) and radiometric (K, Th, U, Tc, ternary RGB, CMY) maps were elaborated. Tends as support the images of Google earth of the study area, and being fallen back upon the programs ArcGIS 9.2 and Photoshop 7.0, it was elaborated the mosaic that later was integrated with the geophysical maps allowing a good combination among these two groups of data. With base in the processing products was possible to define the great magnetic domains, geological structures and limits among the radiometric units. To esteem the depths of the sources of the anomalies maps of solutions they were produced using Euler Deconvolution technique, having shown good results. To aid the interpretation ten profiles they were drawn on the map of the field magnetic anomaly.

Índice

Agradecimentos.....	vii
Resumo.....	ix
Abstract.....	xi
Lista de figuras.....	xvi
Lista de tabelas.....	xx
Síglas e abreviaturas.....	xxi
Lista de equações.....	xxv
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Localização Geográfica.....	1
1.2. Definição do problema e Objectivos do trabalho.....	1
1.2.1. Definição do problema.....	1
1.2.2. Objectivos.....	2
1.3. Organização do trabalho e conteúdo dos diversos capítulos.....	3
CAPÍTULO 2. CARACTERIZAÇÃO DA ZONA EM ESTUDO	6
2.1. Enquadramento geográfico e cultural.....	6
2.2. Divisão administrativa.....	6
2.3. Relevo e vegetação.....	7
2.4. Clima.....	8
2.5. Rede hidrográfica.....	9
2.6. Solos.....	9
2.7. Floresta e fauna bravia.....	11
2.8. Recursos minerais.....	12
CAPÍTULO 3. LOCALIZAÇÃO, PESQUISA BIBLIOGRÁFICA, ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO E UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS.....	13
3.1. Localização.....	13
3.2. Pesquisa bibliográfica e geologia regional.....	14
3.3. Geologia regional.....	17
3.3.1. Unidades litoestratigráficas.....	18
3.3.2. Unidades tectónicas.....	21
CAPÍTULO 4. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS.....	23
4.1. Sistema de cores.....	23
4.2. Modelo de cores aditivo e subtractivos.....	24
4.1. Modelo de cores <i>Intensity hue saturation (IHS)</i> , (<i>brilho, matriz e saturação</i>).....	25

CAPÍTULO 5. GEOFÍSICA.....	28
5.1. Levantamentos aerogeofísicos.....	28
XIII	
5.1.1. Rotina de um levantamento aéreo.....	29
5.1.2. Descrição dos posicionamentos em levantamentos aéreos.....	31
5.2. Prospecção magnética.....	33
5.2.1. Introdução.....	33
5.2.2. Princípios teóricos.....	35
5.2.3. Magnetismo terrestre.....	42
5.2.4. Propriedades magnéticas das rochas.....	46
CAPÍTULO 6. PROCESSAMENTO DOS DADOS MAGNÉTICOS E IMAGENS DE SATÉLITE.....	49
6.1. Imagens de satélite.....	49
6.2. Processamento dos dados aeromagnéticos.....	51
6.2.1. Gradiente horizontal.....	52
6.2.2. Sinal analítico (SA).....	52
6.2.3. Redução ao pólo.....	54
6.2.4. Primeira derivada vertical.....	55
6.2.5. Segunda derivada vertical.....	56
6.2.6. Deconvolução Euler.....	56
6.2.7. Modelação de dados magnéticos.....	63
CAPÍTULO 7. PROSPECÇÃO RADIOMÉTRICA.....	69
7.1. Introdução.....	69
7.2. Radioactividade básica.....	70
7.3. Raios gama.....	70
7.4. Espectrometria de raios gama.....	72
7.5. Correção dos resultados.....	72
7.6. Factores que influenciam a radiação gama.....	73
7.6.1. Recobrimento.....	74
7.6.2. Transporte do recobrimento.....	74
7.6.3. Altura de voo.....	74
7.7. Comportamento geoquímico dos radioelementos na natureza.....	75
7.7.1. Urânio.....	75
7.7.2. Tório.....	76
7.7.3. Potássio.....	77
7.8. Processamento dos dados gamaespectrométricos.....	77
7.8.1. Contagem total.....	78
7.8.2. Canal do potássio.....	78

7.8.3. Canal do tório.....	80
7.8.4. Canal do urânio.....	80
7.8.5. Composição em falsa cor.....	82
CAPÍTULO 8. SÍNTESE DOS RESULTADOS DO PROCESSAMENTO E RESPECTIVA INTERPRETAÇÃO.....	82
8.1. Interpretação geológica-estrutural.....	86
8.1.1. Descrição dos blocos e os respectivos domínios estruturais.....	89
8.2. Estruturas predominantes na área em estudo.....	92
8.2.1. Falhas.....	92
8.2.2. Estruturas circulares.....	93
8.2.3. Diques.....	95
8.3. Interpretação dos dados radiométricos.....	96
8.3.1. Modelo digital de elevação do terreno (MDT).....	96
8.3.2. Potássio.....	97
8.3.3. Tório.....	98
8.3.4. Urânio.....	98
8.3.5. Contagem total.....	98
8.3.6. Imagens Ternárias (RGB e CMY).....	98
CAPÍTULO 9. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	100
9.1. Conclusões.....	100
9.2. Recomendações.....	102
• Referências bibliográficas.....	103
• Sites consultados.....	106
• ANEXOS.....	107
A.1. Procedimentos da aplicação do filtro de redução ao pólo usando Oasis montaj 7.0.....	107
A.2. Procedimentos para a aplicação da Deconvolução Euler 3D 1ª opção.....	107
A.3. Procedimentos para a aplicação da Deconvolução Euler 3D 2ª opção.....	114
A.4. Procedimentos para a aplicação da Deconvolução Euler 3D 3ª opção.....	119

Lista de Figuras

Capítulo 2- Caracterização da zona em estudo

Figura 2.1- Distritos da província de Cabo Delgado adaptado a Lächelt, (2004).....6

Capítulo 3- Localização, pesquisa bibliográfica, enquadramento geológico e unidades litoestratigráficas

Figura 3.1- Mapa de localização geográfica da área em estudo.....13

Figura 3.2- Mapa geológico de área em estudo (adaptado ING, 1987).....19

Capítulo 4- Processamento digital de imagens

Figura 4.1 - Sistema de cores; (A) aditivo *RGB* e (B) subtrativo *CMY*.....24

Figura 4.2- Relação espacial representada por um triângulo, entre o espaço *RGB* e *IHS*.....26

Capítulo 5- Geofísica

Figura 5.1- Programação das linhas de voo típicas em levantamentos aéreos (adaptado de Reynolds, 1997).....29

Figura 5.2- Fluxo magnético em torno de uma barra magnética (Reynolds, 1997)36

Figura 5.3- Aquisição de magnetização (A) terorremanescente, (B) detritica remanescente e (C) química remanescente (adaptado de Lowrie, 1997).....37

Figura 5.4- Representação esquemática da intensidade e orientação dos dipolos elementares na (A) ferromagnéticos, (B) antiferromagnéticos, (C) antiferromagnéticos parasítico e (D) ferrimagnetismo (adaptado de Nagata (1961) e Lowrie 1997)).....39

Figura 5.5- Subdivisão da magnetização uniforme de (A) um grão em (B) dois domínios magnéticos com magnetização oposta e (C) quatro domínios magnéticos com magnetização oposta (Lowrie, 1997).....41

Figura 5.6- Os elementos geomagnéticos: *I* a inclinação do campo magnético, *D* a declinação magnética e *B* o vector campo magnético total (adaptado de Reynolds, 1997).....43

Figura 5.7- Variação da inclinação do campo magnético total com a latitude (Reynolds, 1997).....43

Figura 5.8- Interpretação da velocidade das correntes de convecção no núcleo terrestre relativamente ao manto (Watanabe & Yukutake, 1975).....45

Capítulo 6- Processamento dos dados magnéticos e imagens de satélite

Figura 6.1- Mosaico da área de estudo elaborado a partir de imagens de satélite do <i>Google Earth</i>	49
Figura 6.2 - Parte do mosaico da área de estudo, elaborado a partir de imagens de satélite fornecidas pelo <i>Google</i> , ilustrando linhas de drenagem, zonas com afloramentos, com grande destaque nesta imagem o corpo circular no centro da imagem e a alteração ferruginosa claramente visível no canto inferior directo da imagem.....	50
Figura 6.3- Parte do mosaico da área de estudo, elaborado a partir de imagens de satélite do <i>Google</i> , a partir desta imagem pode se ver estruturas circulares que afloram no lado esquerdo desta imagem, afloramentos de rochas no canto superior direito, para além de dobras, falhas, vias de acessos, que também são bem visíveis nesta imagem.....	50
Figura 6.4- Mapa de anomalias do campo magnético anómalo (CMA) corrigido.....	52
Figura 6.5- Mapa de sinal analítico da área em estudo produzido a partir do mapa de anomalias do campo magnético anómalo (CMA) (Fig.6.4), realçando a geometria real da anomalia magnética.....	53
Figura 6.6- Anomalia magnética (A) nas coordenadas do levantamento (B) reduzida ao pólo.	54
Figura 6.7- Mapa redução ao pólo (RTP) da área de estudo produzido a partir do mapa de anomalias do Campo Magnético Anómalo (CMA) da (Fig.6.4), realçando a geometria real da anomalia magnética.....	55
Figura 6.8- Mapa da primeira derivada Vertical (1ªDV) da área de estudo produzido a partir do mapa do campo magnético anómalo (CMA) da (Fig.6.4), realçando as estruturas geológicas.....	56
Figura 6.9- Interpretações ideais dos índices estruturais sobre os dados aeromagnéticos, segundo Reid <i>et al.</i> , (1990).....	58
Figura 6.10- Ligação dinâmica entre o banco de dados <i>Euler</i> , perfil da coluna <i>grid value</i> e o mapa do sinal analítico tornando fácil a interpretação.....	60
Figura 6.11- Mapa de soluções da <i>Deconvolução de Euler</i> para o índice estrutural 0.....	60
Figura 6.12- Uma parte do mapa de sinal analítico da área de estudo com soluções <i>Euler</i> índice estrutural 0, ilustrando claramente os limites dos corpos com anomalias positivas; de salientar que para a geração do mapa do sinal analítico foi usado o <i>cut off</i> de 0,844 nT.....	61
Figura 6.13- Mapa de soluções da <i>Deconvolução de Euler</i> para o índice estrutural 1.....	61
Figura 6.14- Mapa de soluções da <i>Deconvolução de Euler</i> para o índice estrutural 2.....	62

Figura 6.15- Mapa de soluções da Deconvolução de <i>Euler</i> para o índice estrutural 3.....	62
Figura 6.16- Campo magnético anómalo da área de estudo com dois perfis orientados na direcção E-W (A1-B1 e A2-B2).....	63
Figura 6.17- Perfis 1 e 2 da área em estudo.....	64
Figura 6.18- Campo magnético anómalo da área de estudo com quatro perfis (A3-B3, A4-B4, A5-B5 e A6-B6) orientados na direcção norte sul.....	65
Figura 6.19- Perfis 3, 4, 5 e 6 da área em estudo.....	65
Figura 6.20- Campo magnético anómalo da área de estudo com quatro perfis (A7-B7, A8-B8, A9-B9 e A10-B10) orientados na direcção norte sul.....	66
Figura 6.21 - Perfis 7, 8, 9 e 10 da área em estudo.....	67

Capítulo 7- Prospecção radiométrica

Figura 7.1- Espectros de radiação gama mostrando as posições da janela de energia para cada elemento (adaptada I.A.E.A., 2003).....	72
Figura 7.2- Altitude da Aeronave em cima de montanha íngreme <i>Hunting Geology and Geophysics Limited Report</i> , 1983.....	75
Figura 7.3- Mapa de contagem total da área em estudo.....	78
Figura 7.4- Mapa individual do canal de (A) K e (B) Th da área em estudo.....	79
Figura 7.5- Mapa individual do canal de urânio da área em estudo.....	80
Figura 7.6 – (A) Mapa ternário <i>RGB</i> (K-red, eTh-green e eU-blue) e (B) <i>CMY</i> (K-Cyan, eTh-Magenta e eU-Yellow) da área em estudo produzidos a partir da combinação dos mapas individuais de anomalias do K, Th e U em que se realça os diferentes domínios gamaespectrométricos.....	81

Capítulo 8- Resultados do processamento e interpretação

Figura 8.1- As três imagens que serviram de base para o estudo em causa, nomeadamente: (A) Imagem de satélite, (B) Imagem radiométrica ternária <i>RGB</i> e (C) primeira derivada do campo magnético anómalo.....	84
Figura 8.2 - Imagem de satélite (mosaico), ilustrando vias de acesso, estruturas geológicas mais superficiais (estruturas circulares (Ec), dobras e falhas), afloramentos expostos, vegetação e alterações do solo.....	85
Figura 8.3- Imagem da primeira derivada vertical correspondente a mesma área da (Fig.8.2), ilustrando mais detalhadamente as estruturas circulares (Ec), dobras sobretudo a (anticlinal de	

Montepuez), definidas a partir de anomalias positivas. Sobre esta imagem pode se digitalizar os eixos dos diferentes eventos de dobramento.....85

Figura 8.4- Imagem radiométrica ternária *RGB*, ilustrando detalhadamente os limites (linhas pretas) entre as diferentes unidades gamaespectrométricas da área de estudo. Nesta imagem pode se notar também alguns corpos intrusivos (polígonos traçados com linhas de cor branca) e a falha (linha de cor vermelha).....86

Figura 8.5- Esboço esquemático da divisão da área de estudo em domínios estruturais, blocos dos complexos que afloram na área de estudo: Marrupa M (EW e NE-SW), Xixano chivarro X (NE-SW), Nairoto N (N-S e NE-SW), Meluco ML (NW-SE) e Formações Recentes FR (NE-SW), elaborados a partir de imagens geofísicas nomeadamente gamaespectrometria e magnética, entre parênteses estão os respectivos domínios estruturais.....88

Figura 8.6- (A) imagem da primeira derivada vertical sobreposta a imagem de satélite (mosaico) onde pode se ver diques (linhas de cor preta) e estruturas circulares (polígonos avermelhados) e (B) estruturas aflorantes no bloco de Marrupa (M) diques e estruturas circulares.....90

Figura 8.7- Imagem da primeira derivada vertical duma parte do bloco de Nairoto (N) ilustrando as estruturas geológicas (dobras, estruturas circulares) que afloram nesta região.....91

Figura 8.8- Mapa de densidade de falhas da área de estudo.....93

Figura 8.9 - Mapa da imagem da primeira derivada vertical ampliada, mostrando estruturas circulares simbolizadas pelas linhas verdes, que sofreram efeitos de cisalhamento e tendo sido deformadas (alongadas e achatadas). Aqui está patente a terceira fase de deformação (D_3) caracterizada pelo cisalhamento.....94

Figura 8.10 - Imagem da primeira derivada vertical ampliada ilustrando estruturas circulares sob a forma de aneis (linhas verdes).....95

Figura 8.11- Imagem gamaespectrométricos individual de (A) urânio, (B) tório e (C) potássio.....97

Lista de tabelas

Capítulo 1- introdução

Tabela 1.1- Fases de deformação Pan-africana e as suas evidências Pinna, <i>et al.</i> , (1993).....	2
---	---

Capítulo 3- Localização, pesquisa bibliográfica, enquadramento geológico e unidades litoestratigráficas

Tabela 3.1 - Resumo dos Super-Grupos aflorantes na área em estudo (adaptado de Pinna, <i>et al.</i> , (1993) ; Kröner, <i>et al.</i> , (1997) e Jamal, <i>et al.</i> , (1999)).....	22
--	----

Capítulo 5- Geofísica

Tabela 5.1- Sistemas de posicionamento em levantamento aéreos.....	33
Tabela 5.2- Aplicação dos métodos geomagnéticos (Reynolds, 1997).....	35
Tabela 5.3- Susceptibilidade magnética (K) de rochas e minerais (adaptado de Reynolds (1997), Parasnis (1997), Telford <i>et al.</i> , (1990), Sharma (1986) e (Kearey & Brooks, 1991).	48

Capítulo 6- Processamento dos dados magnéticos e imagens de satélite

Tabela 6.1- Principais índices estruturais aplicados.....	57
Tabela 6.2- Referente ao processamento de dados segundo equação de homogeneidade <i>Euller</i>	59
Tabela 6.3- Interpretação absoluta dos perfis (1 e 2).....	64
Tabela 6.4- Interpretação absoluta dos perfis (3, 4, 5 e 6).....	66
Tabela 6.5- Interpretação absoluta dos perfis (7, 8, 9 e 10).....	67

Capítulo 8- Resultados do processamento e interpretação

Tabela 8.1- Evidências das fases de deformação predominante em cada bloco.....	95
Tabela 8.2 - Resumo da análise qualitativa dos teores dos radioelementos.....	99

Símbolos e abreviaturas

% - Percentagem

π - 3.14

θ - Ângulo entre a direcção do corpo e o norte magnético

(+) - Atitude das estruturas não está disponível na bibliografia consultada.

<- Menor que

= - Igual

> - Maior que

1ªDV - Primeira derivada vertical

a - Coeficiente a

As - Sinal analítico

b - Coeficiente b

Bi - Bismuto

c - Coeficiente c

C₂ - Canal dois

C₃ - Canal três

C₄ - Canal quatro

Ce - Cério

CGM - Campo geomagnético

Cgs - Contagem por segundos

CM - Campo médio

Cm - Centímetros

CMA - Campo magnético anómalo

CME - Campo magnético externo

CMY - *Cian, magenta, yellow*

d - Coeficiente d

D₁ - Primeira deformação

D₂ - Segunda deformação

D₃ - Terceira deformação

DM₁ - Primeira fase de deformação moçambicana

DM₂ - Segunda fase de deformação moçambicana

DNG - Direcção Nacional de Geologia

DP₁ - Primeira fase de deformação Pan-africana

DP₂ - Segunda fase de deformação Pan-africana

DP₃ - Terceira fase de deformação Pan-africana

DPSGM - Direcção Provincial de Serviço Geológico de Moçambique

eTh - Equivalente tório

eU - Equivalente urânio

E-W - Este Oeste

E-W - Este-Oeste

Fig. - Figura

Fe - Ferro

FR - Bloco de formações recentes

G - Gauss

GPS - *Global positioning system*

H - Magnitude

H - Horas

HIS - *Intensity hue saturation*

Hz - Frequência

I - Intensidade

I - Medida da latitude em graus

I.A.E.A. - International Atomic Energy Agency

IGRF - *International Geomagnetic Reference Field*

ING - Instituto Nacional De Geologia

ISS - *Inertial survey systems*

J - Magnetização total

J_i - Magnetização Induzida

J_r - Magnetização remanescente

K - Susceptibilidade por unidade de volume

K₂ - Potássio do canal dois

KHz - Kilo frequência

km - Quilómetros

km/h - Quilómetros por hora

Km² - Quilómetros quadrados

kms - Quilómetros

K - Potássio

M - Bloco de Marrupa

M - Magnetização do materiais

M.a. - Milhões de anos

m/s - Metros por segundo

MB - Moçambique *Belt*

Mev - Mega electro volt

MHz - Mega frequência

ML - Bloco de Meluco

mm - Milímetros

m - Metro

N - Bloco de Nairoto

NE-SW – Nordeste - Sudoeste

NNE-SSW - Norte nordeste – Sul Sudoeste

NNSS - *Navy Navigation satellite system*

N-S - Norte -Sul

nT - Nanotesla

NW-SE - Noroeste- Sudeste

Oe - Oersted

P - Ponto (P)

PDI - Processamento digital de imagens

pH - Potencial de hidrogeniões

ppm - Parte por milhão

RGB - Red, Green, Blue

RTP - Reduced to the pole

S - Saturação

SI/cm³ - Unidade no sistema internacional por centímetros cúbicos

SI/g - Unidade no sistema internacional por gramas

SIG - Sistema de Informação Geográfico

SLR – *Satellite laser ranging*

Tc - Contagem total

Th₄ - Tório do canal quatro

Th -Tório

Ti -Titânio

TI -Tálio

U₃ - Urânio do canal três

US - United States

U - Urânio

WNW-ESSE - Oeste noroeste - Este sul sudeste

WSW- Oeste -Sudoeste

X - Bloco de Xixano Chivarro

Y - Ítrio

Zr -Zircónio

α - Alfa

β - Beta

Υ - Gama

Lista de equações

Capítulo 5- Geofísica

Equação (5.1).....	40
Equação (5.2).....	40

Capítulo 7- Prospecção radiométrica

Equação (7.1).....	73
Equação (7.2).....	73
Equação (7.3).....	73

Capítulo 1. Introdução

À área de estudo é constituída por formações rochosas de aproximadamente 1000 M.a é parte integrante do Precâmbrico. (Afonso *et al.*, 1998 e Jamal *et al.*, 1999) referem que a área em estudo é constituída sobretudo por rochas do conjunto formado por Grupos provavelmente supracrustais moçambicanos ou pré-moçambicanos.

Os Grupos supracrustais compreendem rochas metassedimentares de fácies marinhas, vulcano-sedimentares e ígneas metamorfizadas. Sob o ponto de vista estrutural, estas rochas supracrustais podem ser do tipo alóctone e autóctone (Pinna *et al.*, 1993). O primeiro tipo exhibe geralmente textura laminada, blastomilonítica e ultramilonítica denunciando a sua posição estrutural de cavalgamento e carreamento sobre o soco cristalino moçambicano. As rochas autóctones estão intercaladas por granitóides concordantes metabasitos, quartzitos, gneíseis cálcicos, gneíseis grafitosos, mármore e piroxenitos granatíferos e parecem estar “*in situ*” embora apresentem episodicamente fenómenos locais de tectonização (Pinna *et al.*, 1993).

As formações rochosas da região nordeste de Moçambique, durante o Neoproterozóico sofreram vários processos tectónicos tais como dobramentos, cisalhamentos, falhamentos, diaclasamentos, carreamentos. Como consequência formaram-se dobras, foliações, lineações, falhas estruturas circulares.

1.1. Localização geográfica

A área em estudo localiza-se na província de Cabo Delgado. Os dados aerogeofísicos de alta densidade utilizados neste trabalho fazem parte do bloco 5 e foram cedidos para este estudo pela Direcção Nacional de Geologia de Moçambique.

1.2. Definição do problema e objectivos do trabalho

1.2.1. Definição do problema

A área em estudo, apresenta-se poli-deformada e admite-se que as deformações resultaram da colisão entre o Gondwana Este e Oeste durante a

formação do Moçambique *Belt* (MB) na orogenia Pan-africana 750-550 M.a. (Kröner *et al.*, 1997).

(Pinna *et al.*, 1993) constatou na região norte-nordeste de Moçambique a existência de três fases de deformação Pan-africana a saber: primeira fase de deformação (DP₁), segunda fase de deformação (DP₂) e terceira fase de deformação (DP₃) (Tabela 1.1).

Tabela 1.1- Fases de deformação Pan-africana e as suas evidências (Pinna *et al.*, 1993).

Fase de	Evidências
DP ₁	<ul style="list-style-type: none"> - foliações. - milonitização. - microdobras.
DP ₂	- dobras com orientação NE-SW, resultante do redobramento.
DP ₃	- dobras e zonas de cisalhamento com a orientação NW-SE.

Poucos trabalhos científicos existem acerca da geologia desta região, não obstante as potencialidades geológicas que esta região apresenta. Os poucos trabalhos já publicados, fazem uma abordagem geral da geologia da região norte e nordeste de Moçambique, incluindo a área em estudo.

Para este estudo, recorreu-se a dados de geofísica de alta densidade (espaçamento entre linhas de voo de 300 m, altura de voo de 100 m e a velocidade da Aeronáve durante a recolha de dados era de 250 Km/h) e em simultâneo às imagens de satélite para revelar satisfatoriamente a geologia e a tectónica da região. Com esta metodologia esperava-se que fossem revelados elementos tectónicos não cartografados e, recorrendo ao apoio da informação geológica disponível, interpretar melhor a evolução tectónica da região. Por outro lado, os dados produzidos poderão servir de guião para futuras descobertas de ocorrências e depósitos de minerais na área de estudo.

1.2.2- Objectivos

O presente trabalho tem como objectivo principal contribuir para o conhecimento geológico-estrutural da região norte e nordeste de Moçambique, mais concretamente a região de Cabo Delgado a partir do processamento e

interpretação dos dados da geofísica aerotransportada (magnéticos e radiométricos) e imagens de satélite.

A aplicação dos dados magnéticos teve como objectivos:

- definir domínios magnéticos;
- mapear as estruturas geológicas e definir os domínios estruturais;
- estimativas de profundidades usando a técnica da Deconvolução *Euler*

A aplicação dos dados radiométricos teve como objectivos:

- definir os limites entre as diferentes unidades radiométricas;
- mapear os corpos intrusivos;
- análise qualitativa da ocorrência de K, Th e U.

A aplicação de imagens de satélite teve como objectivos:

- auxiliar os dados geofísicos aerotransportados.

Para atingir os objectivos acima pré-definidos foram traçadas as seguintes fases de trabalho:

1ª Consulta bibliográfica: esta fase foi caracterizada por recolha de informações sobre estudos geológicos levados a cabo na área de estudo.

2ª Fotointerpretação: elaboração do mosaico da área de estudo a partir de imagens de satélite do *Google*. Nesta fase foi feito o georeferenciamento das imagens de satélite usando a técnica de quatro pontos conhecidos.

3ª Processamento: processamento dos dados aerogeofísicos e respectiva integração com as imagens de satélites.

4ª Resultados e interpretação: esta fase constitui a discussão e interpretação dos resultados do processamento e elaboração da dissertação.

1.3- Organização do trabalho e conteúdo dos diversos capítulos

O trabalho que se apresenta encontra-se estruturado com nove capítulos e quatro anexos.

Capítulo 1 (introdução): faz-se uma breve síntese do conhecimento geológico da área em estudo, dos motivos que justificaram a execução deste trabalho e enquadramento geográfico cultural. Localiza-se genericamente a área em estudo e indicam-se os objectivos geral e específicos das técnicas geofísicas

utilizadas. Prossegue-se com a descrição dos conteúdos dos diferentes capítulos, de forma sintética.

Capítulo 2 (Caracterização da zona em estudo): faz-se uma caracterização sócio cultural e económica da zona em estudo.

Capítulo 3 (Localização, pesquisa bibliográfica, enquadramento geológico e unidades litoestratigráficas): faz-se a localização mais detalhada da área em estudo. Prossegue-se com o resumo dos trabalhos científicos publicados que de uma forma geral incidiram, sobre a região norte e nordeste de Moçambique incluindo a área em estudo. Ainda neste capítulo faz-se o enquadramento geológico regional e o resumo de unidades litoestratigráficas e tectónicas.

Capítulo 4 (Processamento digital de imagens): faz-se uma abordagem dos conceitos teóricos considerados relevantes para o processamento e interpretação de imagens digitais nomeadamente sistemas e modelos de cores, brilho, matriz e saturação.

Capítulo 5 (Geofísica): introduz-se os conceitos teóricos e básicos sobre o objecto de estudo da geofísica e sua aplicação, prossegue com os fundamentos teóricos de levantamentos aeromagnéticos, rotina de levantamentos aéreos, descreve os diferentes tipos de posicionamento em levantamentos aeromagnéticos; descreve a prospecção magnética, termina com os conceitos sobre o magnetismo terrestre e propriedades magnéticas das rochas.

Capítulo 6 (Processamento dos dados magnéticos e imagens de satélite): descreve a metodologia de elaboração do mosaico, apresenta uma descrição das técnicas usadas no processamento de dados magnéticos, e discute a modelação e interpretação a partir da técnica de Deconvolução *Euler*.

Capítulo 7 (Prospecção radiométrica): faz-se uma abordagem sobre os radioelementos de ocorrência natural, sobre a radioactividade básica, prossegue com a descrição dos raios gama, espectrometria de raios gamas. Faz-se ainda referência à necessidade de correcção dos dados, aos factores que influenciam a radiação gama e ao comportamento geoquímico dos radioelementos (K, Th e U).

Este capítulo termina com a descrição das técnicas aplicadas durante o processamento dos dados radiométricos.

Capítulo 8 (Síntese dos resultados do processamento e respectiva interpretação): faz-se referência às imagens que constituíram a base para a interpretação. Apresenta a interpretação geológica-estrutural, a descrição dos blocos magnéticos e os respectivos domínios estruturais, faz uma síntese das estruturas predominantes na área em estudo, faz-se o resumo de evidências das fases de deformação que afectaram a região norte e nordeste de Moçambique incluindo a área em estudo e interpreta-se os dados radiométricos (K, Th ,U, as imagens ternárias *RGB* e *CMY*) quando sobrepostos ao modelo digital de elevação do terreno (MDT).

Capítulo 9 (Conclusão e futuros trabalhos): faz-se a síntese das conclusões gerais desta dissertação e uma análise relativa aos trabalhos futuros, necessários para dar continuidade a este tipo de investigação na região norte e nordeste de Moçambique.

A estes capítulos seguem-se as referências bibliográficas e anexos:

Anexo 1: reúne os procedimentos da aplicação do filtro de redução ao pólo usando o Oasis Montaj 7.0.

Anexo 2: reúne os procedimentos para a aplicação da deconvolução euler3D 1ª opção.

Anexo 3: reúne os procedimentos para a aplicação da deconvolução euler3D 2ª opção.

Anexo 4: reúne os procedimentos para a aplicação da Deconvolução Euler3D 3ª opção.

Capítulo 2. Caracterização da zona em estudo

2.1. Enquadramento geográfico e cultural

Cabo Delgado é o berço da etnia Maconde, oriunda do planalto de Mueda, um povo com talento natural para esculpir em madeira e marfim e com uma forte e particular forma de expressão cultural, sendo digna de realce a tatuagem e os dentes afiados com fins de identidade cultural, estético-artísticos e de tradições ancestrais. A zona em estudo tem uma população de 1540000 Habitantes sendo (51% de sexo feminino). A língua oficial é o português falando-se localmente Macua, Makonde, Kimwane, Swahili, Ajaua, Macue e Ingoni.

Geograficamente a zona em estudo é limitada a:

Norte: Rio Rovuma, fronteira natural com a República Unida de Tanzânia

Sul: Rio Lúrio, separa a província de Cabo Delgado da província de Nampula.

Oeste: (sucessivamente de norte para sul); os rios Lugenda, Luambeze, Ruaca e Mewo, separam-na da Província do Niassa.

Leste: Oceano Índico, banhando uma extensão de 425 quilómetros.

2.2. Divisão administrativa

A província de Cabo Delgado tem um conjunto de 16 distritos (Fig. 2.1) que se encontram estruturados em 56 postos administrativos com 128 localidades.

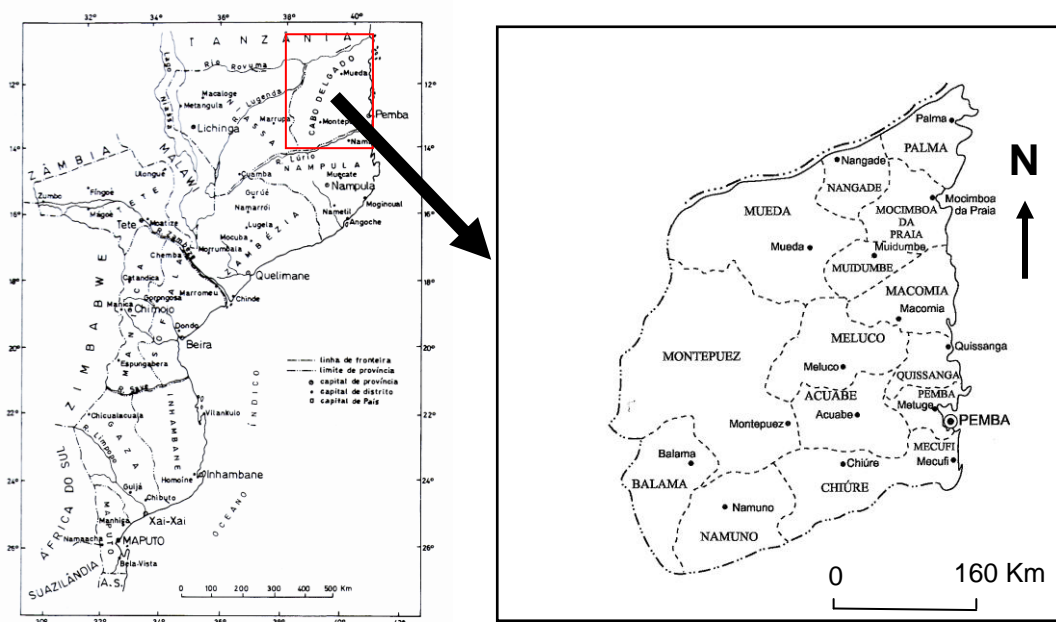


Figura 2.1 - Distritos da província de Cabo Delgado adaptado a Lächelt, (2004).

As cidades de Pemba e Montepuez, e a vila de Mocímboa da Praia, são autónomas do ponto de vista administrativo (Municípios). Para além de Mocímboa da Praia, Cabo Delgado tem mais 3 vilas, Palma, Ibo e Chiúre.

A estrutura governativa a nível Provincial é composta pelo Gabinete do Governador Provincial, as Direcções Provinciais e outras Instituições Públicas daquele nível. As autoridades comunitárias cumprem o seu papel mediador na resolução de conflitos comunitários e outros assuntos de interesse local. Papel importante na educação cívica tem também sido desempenhado pelas autoridades religiosas. A capital provincial, a cidade de Pemba, localizada a noroeste da costa de Moçambique, encontra-se implantada na península meridional de uma das mais belas baías do Mundo – Pemba – e estende-se ao longo de uma colina que se eleva gradualmente até ao chamado " Planalto dos Cajueiros".

2.3. Relevo e vegetação

O relevo na Província distribui-se por três regiões distintas: faixa do litoral – com uma largura de cerca de 100 Kms no sul e 70 Kms no norte e em que a altitude vai crescendo de 10 a 360 m, à medida que se caminha para o interior da província;

Planalto de Mueda – em que a altitude se eleva entre 400 m e 850 m e se ergue na zona interior para o norte, onde se situa o Monte Macaujo, junto a margem direita do rio Lugenda.

Região do Interior (do Centro e Sul) – de altos e baixos, com zonas montanhosas, particularmente nos Distritos de Balama e Namuno, e ao longo do rio Messalo, onde se destacam os montes Muita (1.030 m), Maco (1.220 m), Curri (1.175 m) e as serras Muape (1.050 m), Nicage (985 m), e no Distrito de Macomia a serra Mape (644 m).

A vegetação acompanha, de certo modo, a disposição do relevo: na faixa do litoral, do mar para o interior, aparecem por vezes, junto à costa, alguns mangais seguidos sucessivamente por planícies, savanas de árvores de pequeno e médio porte e matas em que predomina o embondeiro;

- No planalto situam-se as florestas altas ou medianas, por vezes densas, sempre verdes.
- Na região do interior a vegetação é variável, entre savanas e matas abertas, pradarias e florestas medianas por vezes brenhosas, sendo predominantes as matas e florestas. Nas margens dos rios Lúrio, Montepuez, Messalo e Rovuma aparecem algumas planícies aluvionares, e junto aos rios N'guri e Nangade, planícies aluvionares lacustres.

2.4. Clima

De um modo geral, o clima da província é tropical húmido, sujeito ao regime de monções, com duas estações anuais em que se verifica uma desigual e irregular distribuição de chuvas ao longo do ano. A estação quente, das chuvas, ou “verão meridional”, que decorre normalmente, entre os meses de Dezembro e Abril, é caracterizada por pluviosidade de grande irregularidade que, nem sempre, atinge uniformemente toda área do território.

A estação seca começa depois de Junho, onde uma parte da vegetação lenhosa e herbácea se despe da folhagem. Este período coincide com o tempo das queimadas que as populações provocam anualmente, consumindo a vegetação rasteira, algumas árvores e toda a folhagem, não escapando muitas espécies de pequenos animais. Depois de Setembro e com as primeiras chuvas surgem abundantemente as herbáceas e as formações lenhosas que resistiram à acção do fogo, especialmente as espécies denominadas “pirófitas” que atraem herbívoros de todos os tamanhos e animais carnívoros, que as procuram como alimento (Atlas geográfico de Moçambique 1986).

A temperatura média anual varia entre 21,5°C (mínima) e 27°C (máxima) e a pluviosidade varia entre 800 mm e 1000 mm no litoral e região sul, oscilando contudo entre 1000 mm e 1300 mm no planalto de Mueda e nas regiões norte e centro do interior da Província. Ao contrário do que acontece com a temperatura, a pluviosidade apresenta valores mais elevados no interior do que no litoral, aumentando significativamente nos planaltos de Macomia e de Mueda, onde é superior a 1 000 mm por ano. A humidade relativa varia entre os 60% e 80%,

sendo mais elevada na região litoral que recebe influência das correntes dos ventos quentes do Indico, e menos elevada no planalto e no interior da Província.

2.5. Rede hidrográfica

Para além dos rios Rovuma e Lúrio, que a limitam a norte e a sul, respectivamente, a Província de Cabo Delgado é atravessada em todos os seus distritos por importantes rios permanentes ao longo do ano, e por outros rios afluentes e sub-afluentes que, em regra geral, desaparecem na estação seca, em particular nas terras altas. As principais lagoas permanente são: Bilibiza (Quissanga), N'guri (Muidumbe), Chai (Macomia), Nangade e Videre (Nangade, próximo de Mocimboa da Praia).

Estas lagoas apresentam grande interesse pois:

- Mantêm uma fonte de água disponível todo o ano;
- Constituem uma fonte importante de proteínas e, até certo ponto, de actividade económica através da pesca;
- São singularidades paisagísticas que podem vir a ter um grande valor.

2.6. Solos

A faixa do litoral que se estende do rio Rovuma, no norte, ao rio Lúrio, no sul, torna-se cada vez mais estreita de norte para sul. Junto à costa, de Palma ao Ibo, na baía de Pemba, bem como ao longo dos rios Messalo e Montepuez, abundam respectivamente, solos aluvionares marinhos e solos aluvionares fluviais (lacustres no lago N'guri).

Em toda a restante zona da faixa do litoral entre os rios Rovuma e Montepuez existem regassolos e solos pardacentos amarelados e psamíticos, resultantes de sedimentos não consolidados. Entre os rios Montepuez e Lúrio predominam vertissolos derivados de rochas sedimentares calcárias.

Na faixa do interior predominam solos fersialicos pardacentos e crónicos, derivados de rochas cristalinas quartzíferas, com excepção da subzona de Namuno/Balama em que os solos são fersialicos crónicos.

Na faixa intermédia localizada entre as duas faixas referidas anteriormente, predominam litossolos e afloramentos rochosos com ocorrências de solos fersialíticos pardacentos resultantes de rochas cristalinas quartzíferas. No norte, no planalto de Mueda e na região de Macomia, os solos são psamo-fersialíticos provenientes de rochas sedimentares. Coincidindo com esta distribuição dos solos, e de acordo com a história da agricultura da Província, poder-se-ão identificar na Província zonas agrárias a saber:

zona da faixa do litoral, que é plana, em regra, com algumas ligeiras elevações e com vegetação e solos de aptidão agro-pecuária variável por subzona. Na subzona de Quiterajo, os solos são de textura pesada com aptidão diferenciada, praticando-se nela as culturas do caju, algodão e milho. Na vegetação natural predomina o embondeiro;

- (i) na subzona de Mocimboa da Praia e Palma, os solos são levemente lavados a lavados, predominantemente psamíticos, pardacentos ou amarelados, com fraca aptidão para a agricultura e pecuária. Nela abunda o embondeiro, e aparecem mais os coqueiros, sendo uma zona potencialmente favorável à mosca tsé-tsé;
- (ii) a subzona de Quissanga é de terras negras pedocalíticas, férteis e com ricas pastagens naturais ao longo do vale aluvionar do rio Montepuez. Apresenta, em princípio boa aptidão para pecuária e agrícola, sendo as culturas predominantes a mapira, mexoeira, feijões e se cria gado (caprino, suíno e aves), sendo moderadamente infestável pela mosca tsé-tsé. O embondeiro predomina na vegetação natural;
- (iii) na subzona de Mecufi os solos são constituídos por terras negras castanhas pardo-amarelas, arenosas e delgadas na faixa costeira. É propícia para culturas resistentes a seca como o algodão, mapira, mexoeira, sisal, cajueiro e coqueiro. Criam-se caprinos, suínos e bovinos e é susceptível a infestação pela mosca tsé-tsé, com excepção da zona de Megaruma. As culturas mais praticadas são, o cajueiro, a mapira, mexoeira e feijões (tipo regional).

- (iv) a subzona dos vales dos rios Messalo e Lúrio constituída por solos aluvionares fluviais, propícios para a agricultura de regadio por gravidade ou por aspersão, a actividade pecuária e ao cultivo de hortícolas e arroz. É no rio Messalo que se localiza o regadio de N'guri.

zona do planalto de Mueda e regadio de Macomia, de solos profundos, permeáveis e sujeitos a fenómenos de lavagem mais ou menos intensos. Nela se pratica, em regime de exploração intensiva e de rotação, as culturas de milho, amendoim, feijões e mandioca e a criação de caprinos e suínos em regime livre. No triângulo Mocimboa da Praia/Palma/Nangade existem florestas altas e medianas, por vezes densas, sempre verdes, com algumas madeiras preciosas.

zona do interior, que abrange os distritos de Montepuez, Balama, Namuno Chiúre, Ancuabe e Meluco, com solos vermelhos alaranjados e amarelados, normalmente profundos, drenados por vários rios e seus afluentes, e com boa aptidão para a agricultura. A mosca tsé-tsé tem condicionado sobremaneira o desenvolvimento da actividade pecuária (bovinos). As culturas mais vulgares são milho, mapira, arroz, amendoim, feijões, mandioca e algodão, praticadas em regime semi-intensivo.

2.7. Floresta e fauna bravia

Cabo Delgado conta com uma vegetação florestal em que predominam, como tipos zonais, os bosques de miombos caducifolios. Com estes convivem outras formações de substituição ou seja savanas antrópicas e formação de espinhos, consequência da acção antrópica (incêndios, agricultura itinerante, exploração selectiva de madeira, e outros). As principais formações florestais localizam-se no triângulo Mocimboa da Praia-Palma-Nangade e nas regiões que compreendem as áreas de Macomia-Meluco e Gena-Montepuez-Nairoto. Algumas das espécies que a vegetação alberga são de grande interesse comercial, internamente e para exportação, fabrico de objectos de arte e outros fins.

As áreas florestais ocupam cerca de 3 milhões de hectares, o que corresponde a cerca de 39,4% do território da província. Das espécies florestais existentes, destaca-se o pau-preto e o tule (madeiras preciosas), a umbila, o jambire, a chanfuta, o pau-ferro e o mutondo (espécies de primeira qualidade).

O potencial florestal existente, aponta para uma capacidade de abate médio - anual, das diferentes espécies florestais, de cerca de 60 mil metros cúbicos por ano. Os recursos florestais constituem também uma fonte importante, se não a única, de fornecimento de energia (lenha e carvão), às populações, particularmente das zonas rurais.

No distrito de Mueda, nas regiões de Negomano, encontra-se situada uma reserva que se constitui como que um prolongamento da Reserva do Niassa, com uma área de cerca de 214 mil hectares, registando-se adicionalmente potencialidades faunísticas nas imediações do rio Lúrio e nas zonas de Quiterajo, e em grande parte dos distritos da Província.

2.8 - Recursos minerais

Cabo Delgado é rico em ocorrências minerais encontrando-se já identificados na Província jazigos de mármore, grafite, calcário e argila. Há indícios da existência de petróleo na bacia do Rovuma, estando em curso pesquisas para identificação das potencialidades, esperando-se que nos próximos anos seja identificado o local para eventual implantação do primeiro furo. Existem igualmente ocorrências de pedras preciosas e semipreciosas em regiões ainda sob pesquisa.

No momento actual, as únicas actividades de exploração dos recursos minerais localizam-se nos distritos de Montepuez e Ancuabe, em que estão em exploração industrial, jazigos de mármore e de grafite. O mármore é posteriormente tratado numa unidade industrial localizada na Cidade de Pemba, quer o mármore quer a grafite destinam-se ao mercado externo.

Capítulo 3. Localização, pesquisa bibliográfica, enquadramento geológico e unidades litoestratigráficas

3.1. Localização

A área de estudo localiza-se na província de Cabo Delgado com as coordenadas geográficas: 11° 00' ; 13° 00' S e 38° 00' ; 40° 00' E latitude e longitude respectivamente (Fig. 3.1).

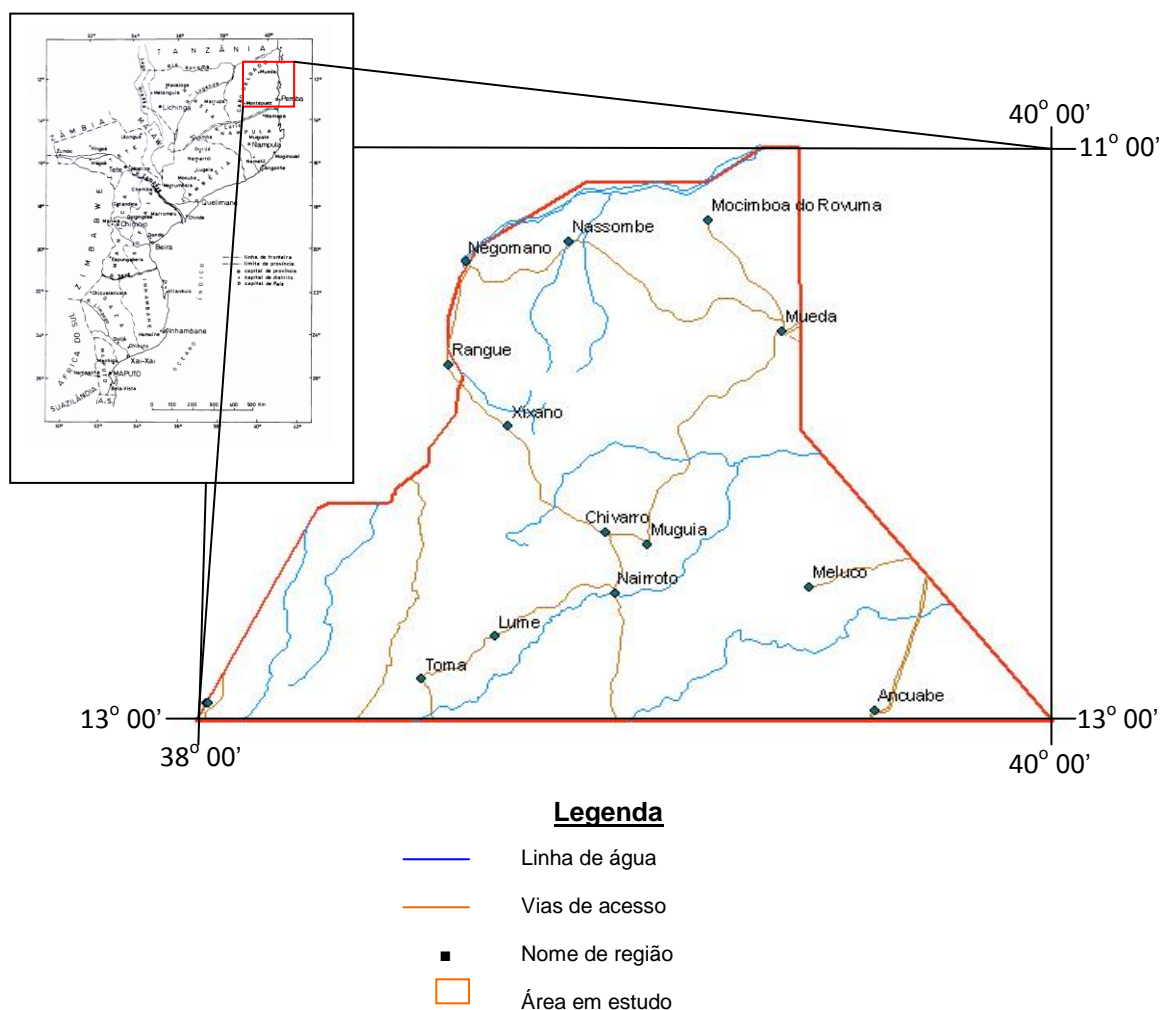


Figura 3.1 - Mapa de localização geográfica da área em estudo.

3.2- Pesquisa bibliográfica e geologia regional

Neste capítulo far-se-á referência a trabalhos em diversas vertentes científicas, publicados por alguns autores, e que estão directamente relacionados com a área geológica da área em estudo. Tentar-se-á em cada trabalho salientar os aspectos que se julga serem os mais relevantes para este trabalho. De salientar que existem muito poucos trabalhos científicos publicados no domínio da geologia sobre a região de estudo, entre os quais destacamos:

- (a) “*The Pre-Cambrian and Associated Rocks of the District of Mozambique*”, publicado por Holmes em (1918).
- (b) Notícia Explicativa do Esboço Geológico de Moçambique na escala 1:2000000, publicado em 1959 por A.J. Freitas.
- (c) Em 1960, G. Flores organizou o “*Outline of Geology of Mozambique*” e 1961, em colaboração com C. de Naseda publicou o documento “*Reconnaissance of Porto Amélia, área de Cabo Delgado*”.
- (d) “*Lúrio Belt*” e o problema da evolução da crosta continental de África no Pré-câmbrico”, um trabalho conjunto de J.R. Araújo e J.M. Barradas, publicado em 1965.
- (e) W. Obrholzer em 1964 e 1968 divulgou os seus trabalhos sobre a geologia de Moçambique com os temas: “*Tectonic map of Mozambique with short explanation (1:2000000)*” e “*Carta Geológica de Moçambique*” também na escala 1:2000000 respectivamente.
- (f) O trabalho intitulado “*Geologia das regiões de Muite, Balama-Montepuez e Moma*” publicado em 1973 por Rui S. Afonso. Em 1976 o mesmo autor publicou o trabalho intitulado “*Contribuição para o conhecimento da tectónica de Moçambique - Notícia Explicativa da Carta Tectónica à escala 1: 2000000*”; em 1978, Rui S. Afonso publicou o trabalho intitulado “*A geologia de Moçambique - Notícia Explicativa da Carta Geológica de Moçambique, 1:2000000*”.
- (g) “*Contribuição para o conhecimento da geologia da área da foz do Lúrio*” publicado em 1974 e cujos autores foram G. Jourde e J.P. Wolf. Ainda no

mesmo ano publicaram um trabalho similar mas desta vez uma contribuição para o conhecimento da geologia da área de Montepuez. De salientar que Montepuez administrativamente, é um dos distritos da província de Cabo Delgado.

- (h) “Esboço geológico do Pré-câmbrico do Norte de Moçambique”, na escala 1: 1 000000, publicado em 1982, por T. Cirilo.
- (i) “*Inventaire minier de l’extrême nord de la Republique Populaire du Mozambique. Reconnaissance géologique*”. Publicado em 1983 por P. Pinna.
- (j) Em 1984 foi publicado um relatório sobre a pesquisa de calcários para cal em Pemba (Capital da província de Cabo Delgado) cujos autores foram F. Marian, Y. Castelet e G. Ballara.
- (k) “*The petroleum geology and hidrocarbon prospectivity of Mozambique*” publicado em 1986 pela Empresa Nacional de Hidrocarbonetos (ENH) de Moçambique sobre a bacia do Rovuma. Este trabalho refere aspectos importante para o trabalho principalmente no que se refere à parte norte;
- (l) O trabalho intitulado “Os recursos minerais da República de Moçambique” publicado em 1993 por Rui S. Afonso e J. M. Marques.
- (m) “*Notice explicative de la carte géologique 1:1000000 de la Republique Populaire du Moçambique*” publicada em 1986 por Pinna e colaboradores em que o trabalho apresentado cobria a área de estudo. Os mesmos autores publicaram em 1987, a Carta Geológica de Moçambique, na escala 1:1000000.
- (n) S. Lächelt publicou trabalhos intitulados “Alguns problemas de geologia, tectónica e metalogenia de Moçambique”, “Carta Metalogénica da Republica de Moçambique na escala: 1: 1 000000” e “*Industrial minerals and rocks of Mozambique*” em 1985, 1993 e 1995, respectivamente.

- (o) “Significado geodinâmico e metalogénico no contexto do cinturão moçambicano e do Orógeno Kibariano” realizado em 1995 por J. Marques, E. Pereira, e C. Dinis, C., relativo ao estudo de cisalhamento de Muepe-Montepuez (norte de Moçambique).

(Holmes, 1951), considerou a região Norte como pertencente ao cinturão de Moçambique. (Jourde e Wolff, 1974) introduziram os termos Série de Nampula; mais tarde estas séries foram consideradas como Super-Grupos por (Pinna & Marteau, 1987).

(Afonso, 1998) descreveu detalhadamente as dobras verticais e as de orientação NS nos charnoquitos de Balama. Este autor interpretou estas dobras (como sendo muito apertadas) e definiu uma orientação geral NE-SW e inclinação para NW. O estudo realizado por este autor permitiu afirmar que a região de Balama é uma frente de cavalgamento possivelmente a bordejar o grupo de Xixano -Chivarro.

(Pinna, *et al.*, 1983) defenderam que todo o cinturão de Moçambique foi formado a cerca de 1100-1000 M.a. (Irumide) e que o evento Pan-africano localmente chamado orogenia moçambicana de aproximadamente 950-800 M.a., foi o único responsável pela deformação e pelo metamorfismo. Esta hipótese já havia sido proposta por (Andreoli, 1984) e reforçada por (Pinna & Marteau, 1987).

Outros autores, através de datações de zircão em gneísseis do *Klippe* de Mugeba e do cinturão de Lúrio, determinaram a idade de 620-520 M.a. para a deformação e metamorfismo da região norte de Moçambique (Kröner *et al.*, 1997; Jamal *et al.*, 1999). Actualmente aceita-se que o maior evento que resultou na formação da crosta no norte de Moçambique, ocorreu no Kibariano (1350 M.a.) e que os cinturões de Moçambique e do Lúrio sofreram dois eventos:

- magmatismo de idade Kibariana (1350 M.a.), (Kröner *et al.*, 1997, Pinna *et al.*, 1983 e Jamal *et al.*, 1999).
- evento Pan-africano (600-520 M.a.) acompanhado de metamorfismo anfibolítico-granulítico (Kröner *et al.*, 1997; Jamal, *et al.*, 1999).

Dos estudos prévios realizados na região norte de Moçambique foram elaboradas cartas geológicas e tectónicas. Como resultado das campanhas de campo efectuadas na área de estudo, entre 1967 e 1985, dos estudos referidos anteriormente e da compilação da informação existente foram apresentadas cinco cartas(três geológicas e duas tectónicas), que a seguir se discriminam:

- Carta tectónica 1:2000000 (DPSGM, 1967).
- Carta geológica 1: 2000000 (DPSGM, 1968).
- Cartas geológicas 1: 1000000 folhas 1339-B, 1339-D , 1339-D₂ e 1340-A (DNG, 1983).
- Carta tectónica 1: 2000000 (DNG, 1985).
- Carta geológica 1:1000000 (ING, 1987).

Estas cartas e os respectivos relatórios estão disponíveis para consultas na Direcção Nacional de Geologia (DNG) em Maputo.

Rui S. Afonso, João M. Marques e Maurício Ferrara publicaram em 1998, uma obra sobre a evolução geológica de Moçambique que abrange a região de Cabo Delgado. Embora se reconheça que esta descrição não é exaustiva, são poucos os trabalhos geológicos realizados exclusivamente sobre a região de Cabo Delgado e os que existem são de carácter geral.

3.3. Geologia regional

Segundo Freitas *et al.* (1957) a geologia de Moçambique está dividida em dois sistemas estruturais distintos:

- (a) Sistema primitivo ou complexo de basamento que é caracterizado por foliações orientadas na direcção E-W à NE-SW designado como Lúrio *Belt* (LB) (Jourde *et al.*,1974);
- (b) Sistema moçambicano caracterizado por foliações orientadas na direcção N-S que representa o Moçambique *Belt* (MB) (Holmes, 1951).

A região Nordeste de Moçambique foi inicialmente descrita como sendo caracterizada pela ocorrência de gneísses que sofreram dobramento, xistos e anfibolitos com intrusões sintectónicas de massas graníticas. (Holmes, 1918) e (Oberholzer,1968), nos seus trabalhos reportaram a ocorrência de

metassedimentos, micaxistos, quartzitos e rochas charnoquíticas perto da fronteira com Malawi.

A área em estudo é caracterizada geologicamente pela ocorrência de paragneísses de grau elevado de metamorfismo, anfibolitos, gneísses anfíbolíticos, quartzitos, gneísses granulíticos, mangeritos gneissícos, migmatitos e rochas plutónicas. O conjunto de ocorrência destas rochas é dividido litoestratigraficamente em Super-Grupo de Lúrio, Super-Grupo de Chiúre e Super-Grupo de Nampula segundo a carta geológica de Moçambique na escala 1:1000000 actualmente em uso (ING, 1987) (Fig. 3.2).

3.3.1. Unidades litoestratigráficas

Segundo (Afonso *et al.*,1998 e Pinna *et al.*,1993) as principais unidades litoestratigraficas aflorantes na região de estudo são Supergrupo de Nampula, Supergrupo de Chiúre e Supergrupo de Lúrio (Fig. 3.2).

Na Tabela 3.1 apresenta-se o resumo do estudo geocronologico das principais unidades litoestratigráficas aflorantes na área em estudo.

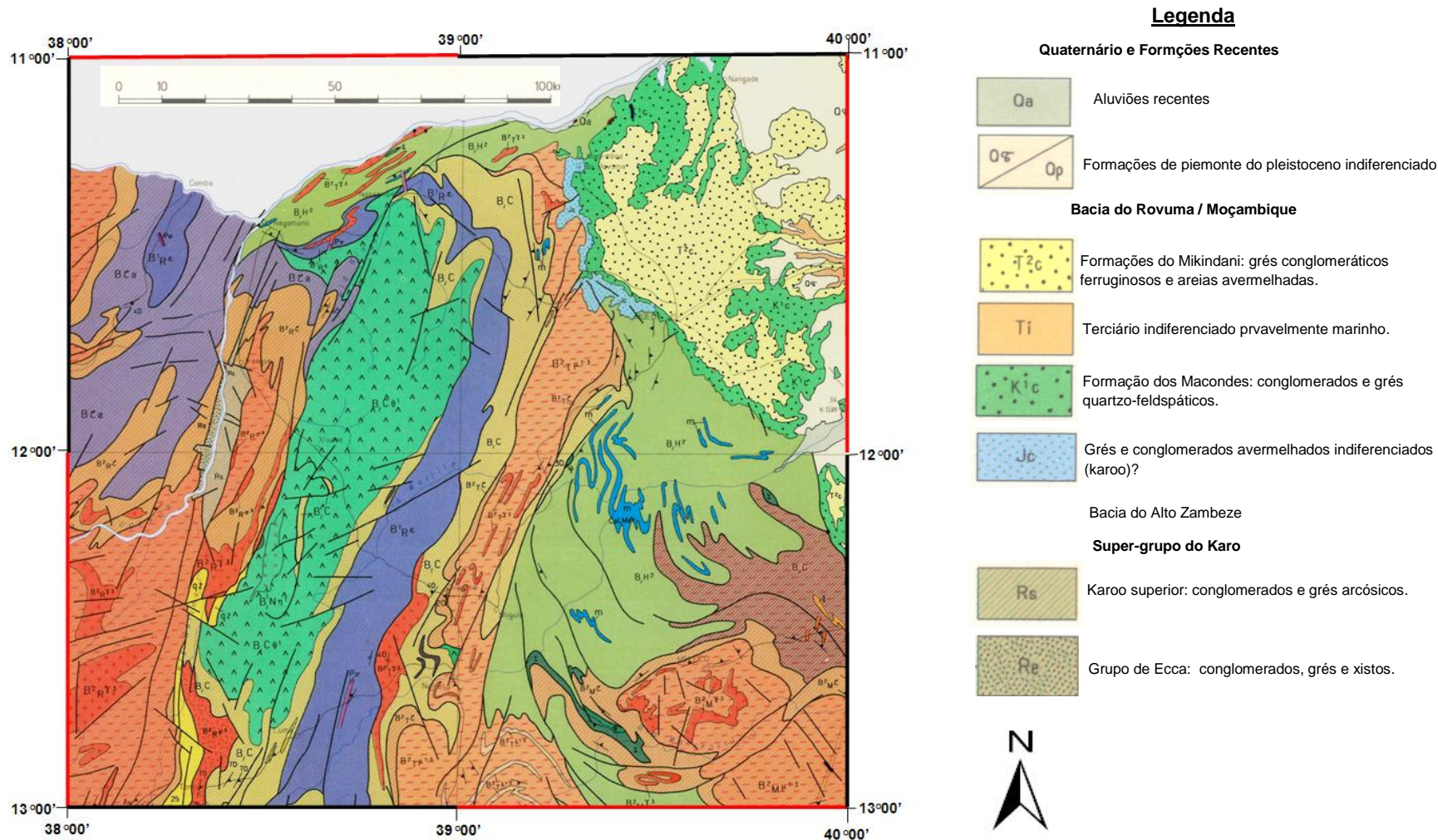





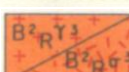


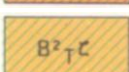
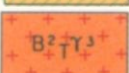
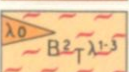
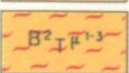



Figura 3.2 – Mapa geológico de área em estudo (adaptado ING, 1987)

Conjuntos Orogénicos Moçambicanos (1.100 a 850 M.a.)

Super-grupo do Lúrio

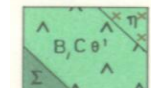


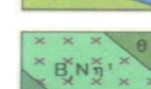

	Granulitos carreados, grupos de M'Sawize, Morrola, Lúrio, Monapo e Mugeba.
	Granulitos máficos geralmente com escapolite.








Conjuntos Migmatíticos e Granitóides Moçambicanos Super-grupo de Nampula

	Milonitos e blastomilonitos.
	Granitos ($B^2_{R^3}$) e sienitos ($B^2_{R^{a3}}$) tardi-sincinemáticos.
	Migmatitos tonalíticos e trondjemíticos.
	Migmatitos monzoníticos com níveis aluminosos (al), leptiniticos (λ) e noríticos (θ).
	Milonitos e blastomilonitos
	Granitos tardi-sincinemáticos.
	Leptinitos alcalinos com níveis hiperalcalinos ($\lambda\theta$).
	Gneisses e migmatitos.
	Milonitos e blastomilonitos.
	Granitos tardi-sincinemáticos.
	Migmatitos graníticos e granodioríticos.

Grupos Provavelmente Supracrustais Moçambicanos ou Pré-Moçambicanos (Ante: 1.000 M.a.)

Super-grupo de Chiúre

	Gabronoritos olivínicos com diferenciados quartzodioríticos (n) e cumalatos ultramáficos (Σ), retrometamorfizados.
	Gneisses anfibólicos, laminados, micaxistos e filonitos, níveis de quartzos (qz), mármore (m), gnaisses aluminosos (al), anfibolitos e piroxenitos (b), ultramafitos (Σ) e gnaisses grafitosos (g).
	Gneisses e anfibolitos com níveis aluminosos (al), espessas camadas marmoríticas e serpentinitos (Σ).
	Dioritos e quartzodioritos retrometamorfizados, níveis de metagabros (θ) e ultramafitos (Σ).
	Gneisses laminados, geralmente leucocráticos, com zonas biotíticas, níveis leucognaisses quartzíticos com pirite (l).

	Estratificação: direcção e inclinação		Fonte termal
	Xistosidade e foliação: direcção e inclinação		Filão (natureza indicada na legenda)
	Limite geológico; limite geológico inferido		Exploração mineira activa ou abandonada
	Contacto tectónico, falhas e fracturas importantes, definidas ou inferidas		

3.3.2- Unidades tectónicas

Segundo Pinna *et al.*, (1993), a tectónica da região em estudo está associada ao evento Pan-africano que afectou toda a região Norte de Moçambique. Este evento explica a razão pela qual são encontradas nesta região estruturas de tipo colisão, associadas a várias fases de dobramento e metamorfismo. O processo Pan-africano ocorreu na região norte e nordeste de Moçambique em duas fases (Tabela 3.1).

Fase Precoce: durante esta fase desenvolveu-se uma sequência de *nappes* do topo para base:

- *Nappes*¹ de M'sawize- Morrola e parte do Lúrio (Super-Grupo do Lúrio), caracterizados essencialmente por materiais da crosta inferior em fácies granulíticas, desenraizados na frente leste da estrutura axial em leque durante a colisão moçambicana.
- *Nappes* de Chiúre (Super-Grupo de Chiúre) formados por materiais da crosta superior, gneísses, xistos, mármore, e quartzitos, em fácies anfibolíticas e de xistos verdes, arrastados na frente dos *nappes* superiores e que constituíam a cobertura do soco estruturado do Super-Grupo de Nampula. Estes *nappes* superiores e inferiores, exibem dobras inclinadas de eixos orientados na direcção NNE-SSW e estiramento orientado segundo a direcção WNW-ESE. A base dos *nappes*, apontam transporte dos materiais para leste segundo a direcção do estiramento (Pinna *et al.*, 1993).

Fase tardia do processo Pan-africano: nesta fase desenvolveram-se os cisalhamentos conjugados de Muepe e Metarica, ao mesmo tempo o cavalgamento para SE a partir da estrutura do Lúrio. Como consequência, os *nappes* do Super-Grupo do Lúrio e os do Super-Grupo de Chiúre, no bloco a sul da estrutura do Lúrio, estão deformados seguindo dobras deitadas de eixos orientados na direcção NE-SW e o estiramento agora orientado na direcção NW-SE. O sentido de cisalhamento na base dos *nappes* implica movimento orientado no sentido SE (Pinna *et al.*, 1983).

¹ Camadas

Tabela 3.1 - Resumo dos Super-Grupos aflorantes na área em estudo (adaptado de Pinna *et al.*, 1993; Kröner *et al.*, 1997 e Jamal *et al.*, 1999).

Supr-Grupo	Litologia	Geocronologia	Metamorfismo	Estrutura
Lúrio	Ortogneisse gabroicos, enderbítico, detritico, plagioclase. Sienito e leucogranito. Gneisse leptinítico e granulitos máficos.	Gneisse enderbítico $1013 \pm 46 \text{ Ma}^{(*)}$. Gneisses leptiníticos: 964 Ma $918 \pm 137 \text{ Ma}^{(*)}$. Granulitos máficos: $956 \pm 76 \text{ Ma}^{(**)}$ e $606 \pm 34 \text{ Ma}^{(**)}$, $1040 \pm 0.6 \text{ Ma}^{(***)}$ e $1114 \pm 0.3 \text{ Ma}^{(***)}$.	2 Px; Grt Hlb castanha. Bi retrograda, Hlb, Mus	DM ₁ - Não foi preservado DM ₂ - Intensa blastomilonitização; Cisalhamento ⁽⁺⁾ Clivagem e zona de cisalhamento ⁽⁺⁾ . -Dobras E-NE com clivagem e zona de cisalhamento provavelmente Pan-Africano inclinado para o norte.
Chiure	<u>Rochas supracrustais.</u> - Quartzo e granito conglomerático, gneisse semiplectítico e aluminoso. - Fácies gneíssicas incluindo rochas metassedimentares gráficas e ricas em alumínio, mármore, lamina finas de rochas máficas (piroxenito, gabro, serpentinito, gabro leucogranítico). - Gneisses de alto grau com camadas gráficas a aluminosas.	$\sim 928 \pm 146 \text{ Ma}^{(*)}$. Granulitos máficos: $973 \pm 159 \text{ Ma}^{(**)}$ e $544 \pm 96 \text{ Ma}^{(**)}$.	Fácies anfibolíticas de P media/ T elevada. Tipos de assembleias: Sil+Grt± Ky; Cpx-Hlb-Musc-Bi-An-Ep (gneisse calco-silicáticos); Trem-Calc-Di-Scap-Pag-Grt± Ol; mármore dolomítico; Act-Musc-Ep-Sph-An±Ky, Stu. Assembleias syn-cinemáticas velhas: Cpx-Plg+Grt. Piroxenito eclogítico reações pós-cinémáticas(simplectito) Musc X Sil+Qzt nos milonitos basais.	DM ₁ - Não foi preservado DM ₂ -Fábrica milonítica altamente cizalhada ⁽⁺⁾ . Com agens de rochas plutónicas e lacólitos, concordantes de granito leptinito. - Redobramento complexo pós DM ₂ ... (NW-SE,NNE-SSW,NE-SW) e E-W- tendência do cinturão do Lúrio.
Nampula	<u>Rochas gneíssicas</u> - Gneisses mesocráticos e migmatito. - Láminas de gneisses trondhjemiticos. <u>Rochas plutónicas</u> - Leuco-gneisses foliados - Granito porfirítico de grão grosseiro e quartzo-sienito em lamina finas e lentes ambos foliados	$1100 \pm 85 \text{ Ma}^{(****)}$. Para-gneisse interacamado: $1082 \pm 33 \text{ Ma}^{(**)}$ e $538 \pm 46 \text{ Ma}^{(****)}$. Gneisse charnoquito granítico: $1070 \pm 95 \text{ Ma}^{(**)}$ e $550 \pm 225 \text{ Ma}^{(**)}$.	Fácies anfibolítica de P media/ T elevada. Assembleia típica: Qzt-An-Kf-Bi-Hlb-Th±Grt-Sil, Cpx.	DM ₁ -Bandeamento migmatítico com dobras abertas a fechadas ⁽⁺⁾ . DM ₂ Foliação redobrada com lineação de estiramento E-W e NW-SE. -Redobramento complexo pós DM ₂ ⁽⁺⁾ .

(*) Datação Rb/Sr por (Jourde & Wolff, 1974) ; (**) Datação de zircão $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ por (Jamal *et al.*, 1999) ; (***) Datação de zircão pelo método $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ por (Kröner *et al.*, 1997) e (****) datação Rb/Sr por (Jourde & Wolff, 1974). (+) Atitude das estruturas não está disponível na bibliografia consultada.

Capítulo 4. Processamento digital de imagens

Devido ao grande volume de dados, os programas de computadores, passaram a ser uma ferramenta de trabalho importante na análise e obtenção de informações de interesse na área das Geociências, utilizando-se para o efeito de manipulação de imagens na forma numérica através de técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI).

A partir do momento em que dados de diversas origens e sensores, possam estar armazenados em conjunto e no mesmo formato, torna-se mais fácil realizar operações como integração, conectividade, sobreposição.

Como os produtos finais de cada sensor possuem características próprias, é necessário uniformizá-los para que sejam integrados de modo adequado. Para isso são utilizadas técnicas computacionais capazes de processarem e analisarem os diferentes dados dentro de uma mesma concepção, e assim, testar a eficiência de uma metodologia sistemática. Neste trabalho de dissertação foram utilizados os dados multiespectrais do *Google Earth*, dados de aerogamaespectrometria e aeromagnetometria.

Qualquer conjunto de dados obtidos por detecção remota, o qual por definição é o processo de medição da radiação electromagnética emitida ou reflectida pelos materiais geológicos, pode ser processada e analisada com o uso de mesmas técnicas de processamento. Neste sentido as imagens de satélite e os dados aerogeofísicos são produtos que reflectem a mesma natureza de informação, com algumas diferenças tanto em relação a processo de detecção da radiação, quanto às regiões do espectro electromagnético analisadas.

4.1. Sistema de cores

As imagens multiespectrais da detecção remota são compostas por diversas bandas, que podem ser visualizadas na forma de composições coloridas de três bandas. As composições constituem uma poderosa forma de sintetizar, numa única imagem, uma grande quantidade de informação, ao mesmo tempo em que representa essa informação em diferentes cores, facilitando assim a sua interpretação.

4.2. Modelo de cores aditivo e substractivos

O modelo de espaço de cores *RGB* (vermelho-verde-azul) é provavelmente o mais usado entre os modelos de cores, especialmente para dados de 8 *bits*. A teoria do espaço de *RGB* (Lillesand *et al.*,1994) é baseada no princípio de que diversos efeitos cromáticos são obtidos pela projecção da luz branca através dos filtros vermelho, verde e azul e pela sobreposição de círculos nas cores projectadas (Fig. 4.1).

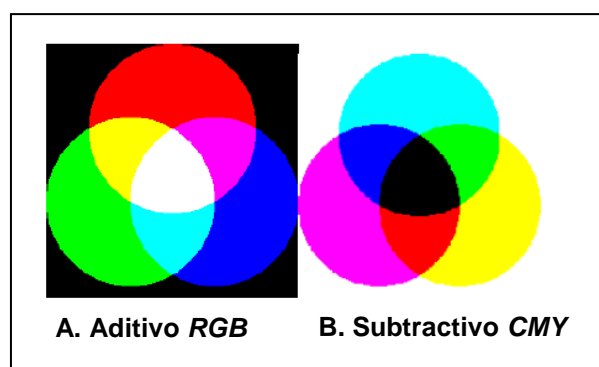


Figura 4.1 - Sistema de cores; (A) aditivo *RGB* e (B) substractivo *CMY*.

A luz branca é produzida se os três círculos coincidirem. Como mostra a (Fig.4.1A), a luz branca é uma composição entre as cores: vermelho, verde e azul, estas cores não podem ser produzidas pela mistura de duas delas, por isso são definidas como cores primárias aditivas. Outras cores são produzidas quando duas cores se misturam, designadamente:

Vermelho + azul → magenta

Vermelho + verde → amarelo

Verde + azul → ciano

Com a variação da quantidade relativa das cores primárias, uma enorme gama de cores pode ser produzida, se incluir diversos tons a cada uma delas. Usando-se filtros, as cores podem ser subtraídas da luz branca (sistema substractivo) (Fig.4.1B), que correspondem às cores produzidas no sistema substractivo, designadamente:

Subtracção de vermelho → ciano

Subtracção de verde → magenta

Subtracção de azul → amarelo

O uso de cores primárias ou secundárias possibilita a representação de qualquer tonalidade de cores: monitores de televisão utilizam cores primárias aditivas e processos de impressão litográfica colorida, cores primárias substractivas.

Portanto, o recurso à paleta de cores, aliado ao conhecimento do comportamento do material alvo em cada banda espectral, permite obter composições coloridas muito eficazes no que diz respeito à distinção destes alvos para o intérprete visual (Crosta, 1993).

4.2.1. Modelo de cores *Intensity Hue Saturation* (IHS), (brilho, matiz e saturação)

Resumidamente, pode-se dizer que a matiz nos informa sobre a cor em um determinado pixel da imagem. Os valores da matiz são dados por ângulos que variam desde 0° correspondendo ao vermelho a 360° (igualmente ao vermelho, pois 360° correspondem a 0°). As outras duas cores verde e azul, têm valores de matiz iguais a 120° e 140° respectivamente (Dutra & Meneses, 1987).

Já a saturação tem como função estimar a pureza da cor. Quanto mais saturada, isto é, quanto maior o valor de saturação, mais pura será a cor. A pureza também está relacionada com a quantidade de cor branca presente na mesma.

Quanto ao brilho, dá nos a informação, de quão iluminada está a imagem naquele momento. Em termos mais apropriados no que se refere à teledeteção, dá-nos uma noção da resposta espectral de um objecto em uma dada banda de um sensor orbital ou aerotransportado.

Tanto os valores de saturação de 0-255 e os de brilho estão compreendidos entre 0-1 (neste caso normalizados). Embora estes intervalos de valores, bem como de matiz, sejam uma notação (poderiam variar de 0 a 255, por exemplo), eles são de uso corrente e aceites consensualmente. Porém encontram-se exemplos de espaços de atributos onde os intervalos diferem desta notação.

O espaço *IHS*, pode ser representado graficamente por um triângulo, como mostra a Figura 4.2.

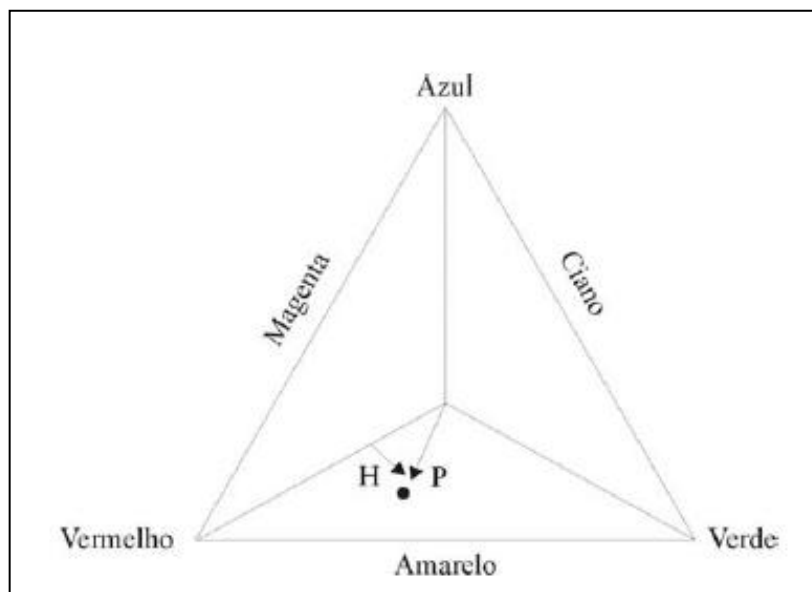


Figura 4.2 – Relação espacial representada por um triângulo, entre o espaço *RGB* e *IHS*.

O modelo *RGB* é definido em relação a um cubo. No entanto os componentes de cor do sistema *IHS* (tonalidade e saturação), são definidos com base no triângulo de cor representado na (Fig. 4.2) em que todas as cores obtidas através da combinação de três outras cores encontram-se dentro de um triângulo cujos vértices são definidos pelas cores iniciais). Ainda na mesma figura e recuperando os conceitos apresentados anteriormente, note que a matiz (*H*) do ponto (*P*), é o ângulo formado entre o seu vector e o eixo do vermelho. Assim, quando $H=0$, a cor é vermelha, quando $H=60^\circ$ a cor é amarela e assim sucessivamente. A saturação (*S*) da cor é proporcional à distância entre *P* e o centro do triângulo (quanto mais afastado estiver o ponto do centro, mais saturada está a cor). Por fim a intensidade (*I*) é a medida relativamente a uma linha perpendicular ao triângulo e que passa pelo seu centro.

A combinação da matiz, da intensidade e da saturação num espaço de cor tridimensional resulta numa estrutura piramidal. Qualquer ponto que se situe na superfície desta estrutura representa uma cor puramente saturada. A tonalidade dessa cor é determinada pelo seu ângulo com o eixo do vermelho e a intensidade pela distância perpendicular da origem do ponto *P* (ou seja, quanto maior for à

distância ao ponto P , maior é a intensidade de uma determinada cor). Relativamente aos pontos situados dentro da estrutura, a situação é semelhante, residindo a diferença no facto das cores se tornarem menos saturadas à medida que se aproximam do eixo vertical.

Por serem independentes, do ponto de vista de percepção visual, estes três parâmetros podem ser analisados e modificados separadamente, para um melhor ajuste das cores às características do sistema visual.

A transformação dos componentes *RGB* nos componentes intensidade, matriz e saturação *IHS* pode ser utilizada para produzir composições coloridas com reduzida correlação inter-banda, consequentemente com melhor utilização do espaço de cores, e combinar diferentes tipos de imagens ou imagens de diferentes sensores. Estas transformações são feitas através de algoritmos matemáticos que relacionam o espaço *RGB* ao *IHS*.

Para produzir composições coloridas, escolhem-se três bandas de uma imagem e associa-se a cada banda a um dos componentes *RGB*. Executa-se a transformação *IHS* “*pixel*” a “*pixel*”. Cada *pixel* na imagem de saída possuirá um ponto correspondente no espaço *IHS*. O resultado é um conjunto de três novas imagens: uma de intensidade, uma de matiz e outra de saturação. Estas imagens são realçadas, de modo a expandir o intervalo de intensidade e saturação através das técnicas convencionais de contraste, e novamente transformadas para o sistema *RGB*, permitindo assim melhor separação das estruturas que se deseja observar (Crosta, 1993).

Encontram-se na literatura, diversos modelos com o propósito de representar os atributos de cor, dentre os quais destaca-se o modelo *IHS*. O espaço de cores conhecido por *IHS* (*Intensity Hue Saturation*) é uma forma alternativa ao espaço *RGB* de representação de cores. As cores são definidas pelos atributos de intensidade ou brilho, matiz e saturação. Estes atributos podem ser analisados e manipulados individualmente, ao contrário do sistema *RGB*, onde eles são intrinsecamente interligados (Crosta, 1993).

A intensidade ou brilho é a medida de energia total envolvida em todos os comprimentos de onda, sendo portanto responsável pela sensação de brilho dessa energia incidente .

A matiz ou cor de um objecto é a medida do comprimento de onda médio da luz que se reflecte ou se emite, definindo, portanto, a cor do objecto.

A saturação ou pureza expressa o intervalo de comprimento de onda ao redor do comprimento de onda médio, no qual a energia é reflectida ou transmitida. Um alto valor de saturação resulta em uma cor espectralmente pura, ao passo que um baixo valor indica uma mistura de comprimentos de onda que irá produzir tons apagados.

Capítulo 5. Geofísica

A Geofísica é a ciência que aplica princípios básicos de Física ao estudo da Terra. A Geofísica envolve o estudo da Terra através de observações directas, medindo propriedades físicas com instrumentos apropriados, geralmente colocados na superfície. Contrariamente a Geologia que envolve o estudo da Terra através de observações directas de rochas que estão expostas na superfície ou de amostras de sondagens e a consequente dedução de sua estrutura, composição e história geológica pela análise de tais observações.

A Geofísica é aplicada na exploração de recursos (minerais, petróleo, materiais industriais), recursos hídricos, geotecnia, etc. A Geofísica apresenta vantagens sobre métodos tradicionais de sondagem, porque os métodos geofísicos são não invasivos, não destrutivos e mais baratos.

5.1. Levantamentos aerogeofísicos

Os métodos aerogeofísicos mais comuns são os magnéticos, radiométricos, gravimétricos e electromagnéticos. Os levantamentos aerogeofísicos são especialmente indicados para a investigação de áreas de grande extensão ou de difícil acesso e são frequentemente utilizados em campanhas de reconhecimento e, esporadicamente, integram os trabalhos geofísicos na fase de detalhe. São realizados ao longo de linhas paralelas, previamente estabelecidas para o plano de voo (Fig.5.1), em geral com espaçamento de 100 a 1000 m. As linhas adicionais de controlo, cruzam as linhas de produção (Reynolds, 1997).

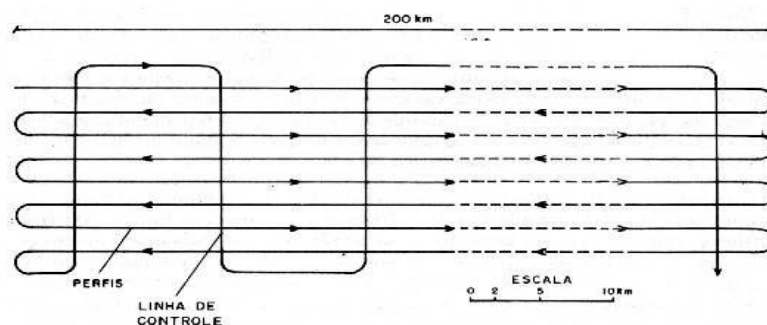


Figura 5.1- Programação das linhas de voo típicas em levantamentos aéreos (adaptado de Reynolds, 1997).

Os levantamentos aerotransportados devem ser realizados a uma altitude de (150 m) e velocidade constantes (menos de 200 km/h), podendo ambas serem menores em casos de utilização de helicópteros. A altitude pode ser tomada constante em relação ao terreno ou ser simplesmente uma altitude barométrica.

O posicionamento da Aeronave nas posições desejadas para o trabalho, pode também ser exercido com base em fotos prévias, parte de fotomosaicos, nas quais o co-piloto observa aspectos característicos do terreno que possam servir de referência (estradas, rios, vales, elevações), de modo a cumprir as linhas de voo pré-estabelecidas (Reynolds, 1997).

5.1.1. Rotina de um levantamento aéreo

De acordo com a Northway Corporation *Ltd* (1982), a rotina de um levantamento aéreo resume-se a:

- 05:45 h - Técnicos em Electrónica e engenheiros de voo chegam ao avião. Equipamento e avião começam a ser verificados.
- 06:15 h - Pilotos do avião chegam á Aeronave e verificam as condições meteorológicas, o plano de voo e o Avião.
- 7:00 h - Todas as verificações dos equipamentos foram completadas; o Avião descola.
- 7:05h – Uma passagem sobre a pista de descolagem é efectuada á altura de 150 m, mesma direcção dos voos anteriores, para verificação das medidas (*runway check*). O magnetómetro e os outros equipamentos geofísicos são

testados, para verificar se duplicam os níveis e os perfis dos traços obtidos nas verificações anteriores.

- 07:10 h - Terminada a verificação, o Avião sobe a 900 m e dirige-se para onde iniciará as medições. Durante esse percurso (que pode durar de 15 minutos a 1:45 h), os técnicos em electrónica verificam o Avião.
- 07:45 h – O Avião chega ao local do levantamento. O levantamento é iniciado (caso o tempo esteja bom).
- 08:05 h – Com todos os sistemas ligados, o Avião é conduzido ao longo da primeira linha, a altura de 150 m.
- 10:00 h – A primeira linha é concluída. O Avião é (algumas vezes) levado à altura de 900 m acima do terreno para uma segunda verificação do Avião.
- 10:05 h – Enquanto a Aeronave faz a volta para iniciar a próxima linha, novo cabeçalho é colocado no sistema digital e os registos de voo referentes à nova linha são preenchidos (linha por linha, esse procedimento é repetido até ao ponto em que as reservas de combustível são suficientes apenas para a volta à base, a menos que o mau funcionamento de algum equipamento faça o Avião retomar mais cedo à base.
- 14:50 h – Nova verificação da Aeronave é feita durante o voo de retorno.
- 15:30 h – É feita uma verificação sobre a pista de descolagem, como a descrita às 7:05 h.
- 15:35 h – O Avião aterra, é abastecido e estacionado na área onde irá pernoitar.
- 6:15 h – Os técnicos em electrónica iniciam as verificações pós voo, enquanto o engenheiro de voo inspecciona o Avião. Os pilotos discutem os planos de voo do próximo dia e levam os dados para o escritório.
- 17:15 h – Os técnicos e engenheiro são transportados para o escritório ou para o alojamento.

- 18:30 h – O dia de voo termina quando os filmes de registo são revelados e verificados, e o geofísico encarregado compara os testes realizados no dia com os dos dias anteriores.

5.1.2- Descrição dos posicionamentos em levantamento aéreos

Radioposicionamento

O radioposicionamento é obtido pela diferença de tempo ou na fase entre a transmissão e a recepção de pulsos de ondas electromagnéticas de radiofrequência (acima de 3 kHz) o que permite a localização da plataforma ou veículo, através do sistema de radioposicionamento, pois a velocidade das ondas é conhecida (3×10^8 m/s). Os sistemas de radioposicionamento podem ser de visibilidade directa e de longo alcance. Na visibilidade directa são empregues pulsos de alta frequência (200-10000 MHz) ao longo de uma linha de voo. No sistema de longo alcance usa-se sinais codificados de frequências muito inferiores aos do sistema de visibilidade directa (10 a 5000 kHz).

O sistema de radioposicionamento em visibilidade directa apresenta uma precisão superior à dos demais sistemas de longo alcance e são adequados para actividades que envolvem trabalhos não muito grandes entre a plataforma e as estações. O alcance desse sistema é limitado pela curvatura da Terra bem como da altura da transmissão do alvo. Em regiões tropicais como é o caso de Moçambique e, em particular a área de estudo, a atmosfera, devido ao seu elevado gradiente de temperatura, permite a refacção de ondas de alta-frequência e esses sistemas passam a operar com um alcance até quatro vezes maior.

Os sistemas de longo alcance, permitem trabalhos a distâncias maiores, mas nem sempre apresentam a precisão necessária e não são muito adequados para a luz do sol; interferência das ondas reflectidas pela ionosfera (*sky waves*), torna-se variável ao pôr-do-sol e ao amanhecer o que diminui a eficiência deste sistema.

Posicionamento doppler

O efeito *doppler* corresponde ao deslocamento aparente na frequência de uma onda, devido a compressão da frente de onda pelo movimento de uma fonte com respeito à recepção ou vice-versa. Nos sistemas de posicionamento *doppler*, a variação entre a frequência das ondas transmitidas e recebidas pela plataforma após sofrerem reflexão no terreno é detectada. Como a variação na frequência é proporcional à velocidade da plataforma, esta pode ser obtida e, uma vez integrada, fornece a posição desejada. Em geral são utilizadas transmissões para frente, para trás e para ambos os lados da plataforma, o que permite determinar diferentes componentes do movimento da plataforma.

Posicionamento inercial

No posicionamento inercial ou *ISS (Inertial survey systems)*, a aceleração da plataforma é determinada e a sua integração fornece a velocidade da plataforma bem como a sua posição, com mais uma integração. Tal como sistemas *doppler*, os sistemas inerciais são acondicionados na plataforma e dependem do posicionamento periódico por meio de outros sistemas para a correcção dos erros que se acumulam com as integrações.

Posicionamento por satélites

No Sistema *GPS*, estabelecido em 1974 pela *US Air Force*, a localização da plataforma pode ser obtida, como em vários sistemas de radioposicionamento, a partir do tempo de propagação de ondas de rádio entre o satélite e a plataforma sendo conhecido o tempo de transmissão de pulsos ou a partir de diferença de fase entre o sinal recebido do satélite e um sinal de referência gerado no próprio receptor (este procedimento fornece dados de maior precisão).

O posicionamento pode, ainda, ser feito com base no efeito *doppler* como no sistema *transit*. A transmissão é feita nas frequências de 1227,60 e 1575,42 MHz, essa última para uso civil desde 1984 e inclui informação sobre o tempo de transmissão dos impulsos.

A constelação *GPS* foi idealizada com dezoito satélites activos, três em cada uma das seis órbitas circulares a cerca de 20169 km, e dez satélites sobressalentes, três em órbita para substituição rápida de satélites activos que

apresentam problemas do funcionamento e sete em Terra. Cada Satélite cobre de 30 a 35% da superfície terrestre. As órbitas são regularmente espaçadas de forma que cada uma apresente uma inclinação de 55° em relação à outra e o período orbital é de 12 horas. Como consequência, é possível em cada ponto da Terra receber sempre o sinal de vários satélites.

Os sistemas de posicionamento mais adoptados são (Tabela 5.1):

- Radioposicionamento
- Posicionamento *doppler*
- Posicionamento inercial
- Posicionamento por meio de satélites (*Transit*, *Navsat* ou *NNSS-Navy Navigation satellite system*, *Navstar* ou *GPS- Global Positioning System* e *SLR – Satellite Laser Ranging*).

Tabela 5.1- Sistemas de posicionamento em levantamento aéreos

Sistema	Tipo	Alcance	Precisão
Radioposicionamento	Visibilidade directa	$10^2 - 10^5$ m	1-10 m
	Longo Alcance	$10^4 - 10^6$ m	$1-10^3$ m
<i>Doppler</i>	<i>Radar Doppler</i>	Limitado pela precisão	0,2 % Distância
	<i>Sonar Doppler</i>		
Inercial		Limitado pela precisão	$\frac{1}{2}$ <i>Doppler</i>
Satélite	<i>Transit</i> (150 e 400 MHz)	Ilimitado	10 m
	<i>GPS</i> (1227,6 e 1575,42)	Ilimitado	$1-10^{-2}$ m

5.2. Prospecção magnética

5.2.1. Introdução

A primeira análise científica conhecida do campo magnético terrestre foi publicada em 1600 por William Gilbert, no seu livro *De Magnete*. Mais tarde, em 1940, na Suécia, mediram-se as variações do campo magnético terrestre com o intuito de localizar depósitos minerais. Os primeiros instrumentos construídos com objectivo de medir algumas componentes do campo magnético terrestre foram desenvolvidos em 1870 por Thalén e Tiberg.

Em 1915, Adolf Schmidt criou o magnetometro de balança. Durante a Segunda Guerra Mundial desenvolveu-se o magnetómetro de fluxgate, que permitiu a

execução de levantamentos aeromagnéticos. A partir de meados da década de 50, do século passado, desenvolveram-se magnetómetros de precessão protónica. Esses magnetómetros permitiram aliar uma maior precisão à simplicidade e rapidez do seu manuseamento. Na década seguinte desenvolveram-se os magnetómetros de bombagem óptica, que permitiram a obtenção de medições de forma mais rápida e precisa, sendo por isso especialmente adaptados na prospecção aeromagnética. A partir da década seguinte a aplicação de gradiómetros magnéticos permitiu não só a medição da intensidade do campo magnético total, mas também do gradiente entre sensores e a remoção dos efeitos da variação temporal do campo magnético. Actualmente, o registo e o processamento dos dados sob a forma digital, aliados à aplicação de algoritmos interpretativos, facilitam a correcção e interpretação dos dados magnéticos.

O objectivo dos métodos de prospecção magnética é o de investigar a geologia subsuperficial a partir das anomalias do campo magnético terrestre relacionadas com as propriedades magnéticas das rochas.

Embora a maioria dos minerais não possua propriedades magnéticas, algumas rochas possuem minerais magnéticos em quantidade suficiente para produzirem anomalias magnéticas significativas. De igual modo, alguns objectos antropicos geram anomalias magnéticas, o que permite que os métodos geomagnéticos possam aplicar-se na resolução de situações variadas (Tabela 5.2), desde de investigações localizadas, do domínio da engenharia ou da arqueologia, até à prospecção à escala regional, na investigação de estruturas geológicas regionais, por vezes em combinação com métodos gravimétricos e sísmicos.

Os métodos geomagnéticos podem aplicar-se em terra, sobre a água ou no ar, e a sua rapidez de execução, aliada à capacidade de aplicação à escala terrestre, ao seu baixo custo e à quase ausência de correcções (Telford *et al.*, 1990), tornam-nos mais atractivos na prospecção de depósitos minerais que contenham minerais magnéticos. Em contrapartida, tal como acontece em todos os métodos de potencial, as anomalias podem ser modeladas de várias formas, originando várias soluções para uma mesma determinação.

Tabela 5.2- Aplicação dos métodos geomagnéticos (Reynolds, 1997)

Localização
Conduitas, cabos e objectos metálicos
Materiais de artilharia soterrados (estilhaços, granadas, minas, etc.)
Contentores metálicos soterrados
Galerias e poços de minas
Mapeamento
Estruturas arqueológicas
Diques de rochas ígneas básicas
Filões de minerais metálicos
Limites entre corpos geológicos com comportamento magnético contrastante, incluindo falhas
Estruturas geológicas a grande escala

5.2.2- Princípios teóricos

Em torno de uma barra magnética existe um fluxo magnético (Fig.5.2). Este fluxo converge nas extremidades, conhecidas como pólos magnéticos.

Se a barra for suspensa de modo a permitir a sua movimentação, ela alinhar-se-á com o campo magnético terrestre, de modo a que o seu pólo sul (ou pólo positivo) aponte para o pólo sul magnético terrestre. Nessas condições os pólos magnéticos formam pares magnéticos de sentidos opostos, usando-se por isso o termo dipolo. Quando um deles se afasta, de tal modo que o seu efeito sobre o outro pólo deixa de se fazer sentir, passa a constituir, teoricamente, um mono-pólo.

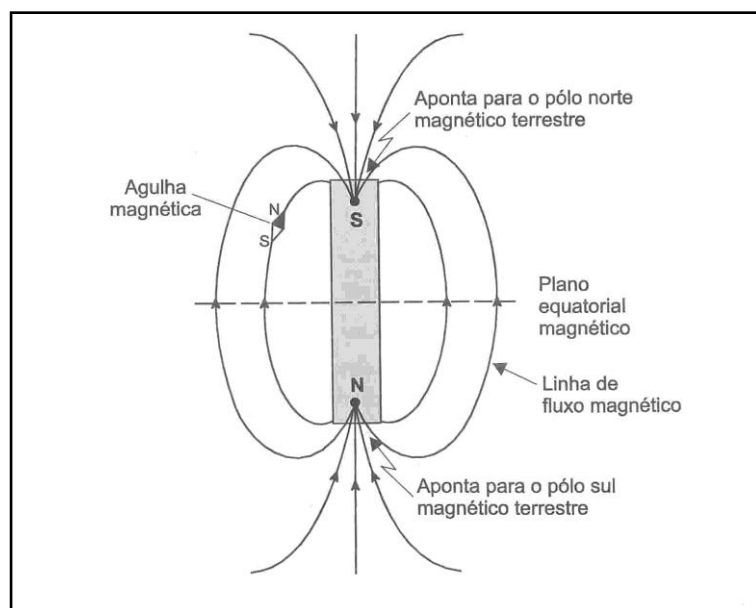


Figura 5.2- Fluxo magnético em torno de uma barra magnética (Reynolds, 1997)

Em muitos casos, na ausência de um campo indutor, verifica-se a presença de uma magnetização quantificável devida à intensidade do campo magnético interno desse corpo, originada em partículas com comportamento magnético permanente. A intensidade desta magnetização permanente ou remanescente é anotada por J_r .

A magnetização remanescente pode classificar-se em primária e secundária (Kearey & Brooks, 1991). A magnetização remanescente primária pode verificar-se nas rochas ígneas, à medida que os seus minerais com comportamento magnético arrefecem e solidificam (magnetização termorremanescente) (Fig. 5.3A), ou nas rochas sedimentares, à medida que as partículas com comportamento magnético se depositam alinhadas com o campo magnético terrestre (magnetização detrítica remanescente) (Fig. 5.3B). a magnetização remanescente secundária pode ser adquirida posteriormente à formação das rochas, aquando da recristalização ou crescimento de minerais magnéticos durante a diagénese ou durante o metamorfismo (magnetização química remanescente) (Fig. 5.3C).

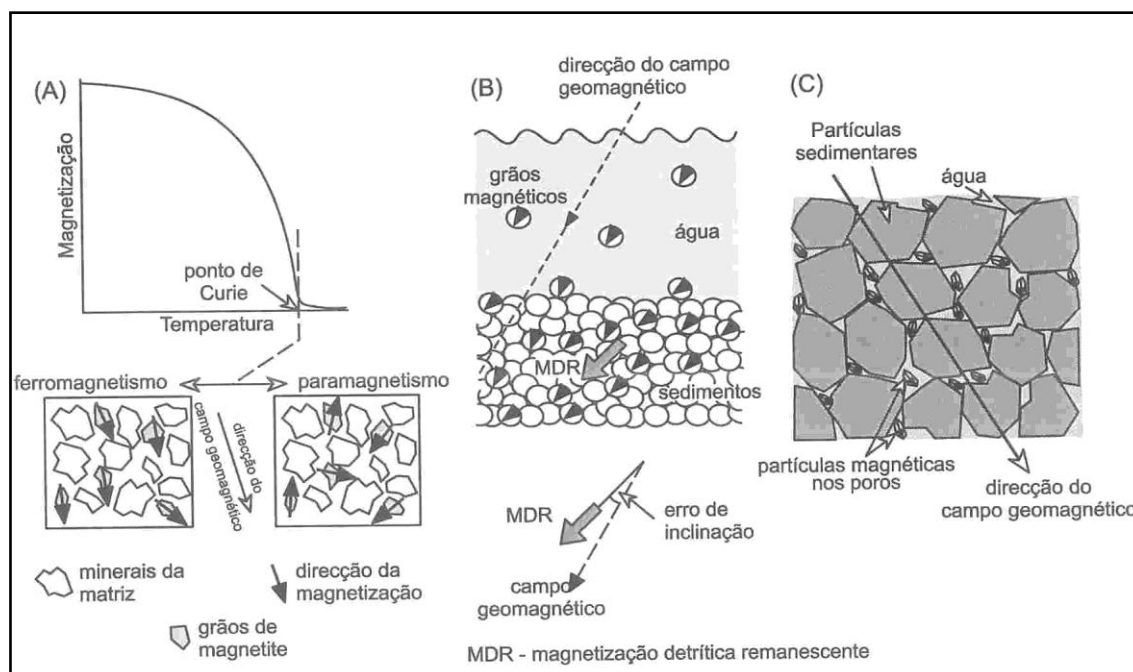


Figura 5.3- Aquisição de magnetização (A) termorremanescente, (B) detritica remanescente e (C) química remanescente (adaptado de Lowrie, 1997).

A magnetização residual que se verifica após a remoção de um campo externo é designada por magnetização isotérmica remanescente, enquanto que a magnetização que resulta da exposição prolongada a um campo magnético externo se designa por magnetização viscosa remanescente.

Um corpo rochoso que contenha minerais magnéticos exibirá uma magnetização induzida e uma magnetização remanescente. A intensidade e a orientação da magnetização resultante (J), condicionarão a amplitude e a forma da anomalia magnética.

Todas as substâncias, à escala atómica, exibem propriedades magnéticas já que cada átomo funciona como um dipolo devido ao movimento de rotação de cada um dos electrões e ao movimento orbital do conjunto dos electrões em torno do núcleo.

A teoria quântica, de acordo com o princípio de exclusão Wolfgang Pauli, permite a coexistência de dois electrões num mesmo nível magnético desde que possuam rotações em sentidos opostos. Dois electrões nestas circunstâncias designam-se por electrões emparelhados e os momentos magnéticos resultantes das suas rotações anulam-se.

Na maioria das substâncias, na ausência de um campo magnético externo, os momentos magnéticos dos átomos devido à rotação dos electrões distribuem-se aleatoriamente e não geram uma magnetização. Nos materiais ditos diamagnéticos, como a halite, todos os electrões se encontram emparelhados e na presença de um campo magnético externo as órbitas dos seus electrões modificam-se de modo a criar um campo magnético oposto ao campo externo. Consequentemente a susceptibilidade dos materiais diamagnéticos é fraca e nos materiais paramagnéticos, como as anfíbolas, piroxenas, olivinas, granadas e biotite, exibem electrões desemparelhados que originam interações magnéticas entre átomos adjacentes. Estes minerais, sob a influência de um campo magnético externo desenvolvem um campo magnético com o mesmo sentido do campo externo e a sua susceptibilidade, fraca e positiva, decresce inversamente com a temperatura absoluta.

Nos materiais ferromagnéticos, nos quais se incluem o ferro, cobalto e o níquel os dipolos são paralelos entre si (Fig. 5.4A) originando uma susceptibilidade muito elevada e uma magnetização espontânea intensa, que pode permanecer mesmo na ausência de um campo externo. As propriedades ferromagnéticas desaparecem quando os materiais atingem a chamada temperatura de Curie, a partir da qual passam a exibir comportamento paramagnético.

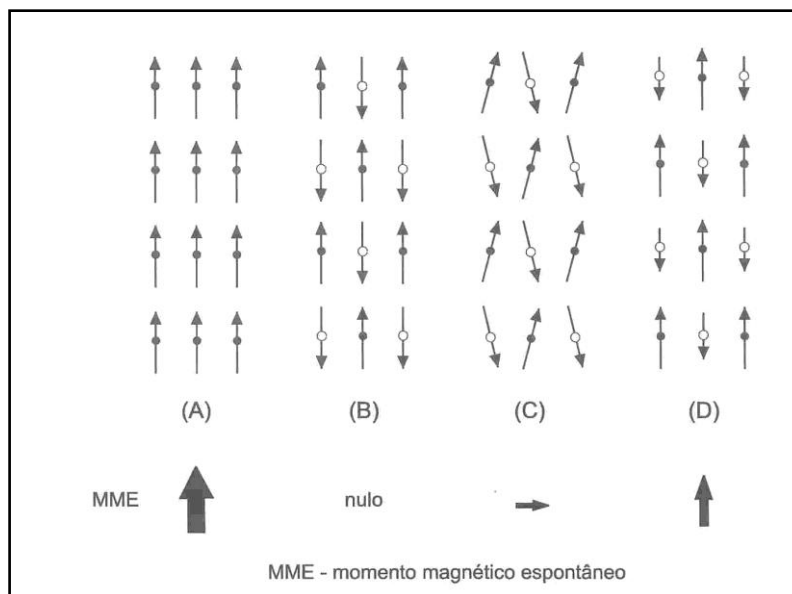


Figura 5.4 - Representação esquemática da intensidade e orientação dos dipolos elementares nos materiais ferromagnéticos (A), nos materiais antiferromagnéticos (B), nos materiais antiferromagnéticos parasíticos (C) e nos materiais ferrimagnéticos (D) (adaptado de Nagata, 1961 e Lowrie, 1997).

Nos materiais antiferromagnéticos (Fig.5.4B), como por exemplo a hematite, os dipolos encontram-se alinhados em sentidos opostos em igual número, anulando-se entre si. No entanto, nos casos em que a estrutura cristalina seja defeituosa, contenha vazios ou impurezas, desenvolve-se uma magnetização designada por antiferromagnetismo parasítico (Fig. 5.4C) (Reynolds, 1997; Lowrie, 1997).

Nos materiais ferrimagnéticos (Fig.5.4D), como a magnetite, titanomagnetite, ilmenite e pirrotite, os dipolos também se encontram alinhados em sentidos opostos, mas o número de dipolos orientados numa direção não iguala o número de dipolos orientados na direção oposta. Em consequência, os materiais ferrimagnéticos exibem uma magnetização espontânea intensa e uma susceptibilidade elevada. As propriedades ferrimagnéticas desaparecem a temperaturas superiores à de Curie (570° C).

As propriedades dos materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos, variam com a dimensão dos seus grãos minerais. Considere-se um conjunto de grãos de um mineral ferrimagnéticos uniformemente magnetizados, caracterizados por uma magnetização espontânea (J_s) e volume granular uniforme (V). Se a magnetização

espontânea se orientar paralelamente a uma direcção que facilite a magnetização (plano de cristalização ou plano que condicione a forma do grão), definida pela energia de anisotropia (K_u) por unidade de volume, então a energia que permite que a magnetização permaneça paralela a essa direcção será igual:

$$V \times K_u \quad (5.1)$$

À temperatura T a energia térmica, do grão será igual:

$$K \times T \quad (5.2)$$

Onde K é constante de *Boltzmann*².

A energia térmica proporcional à temperatura, perturba esse alinhamento. Em qualquer instante, existe a possibilidade de a energia térmica modificar o momento magnético de um grão afastando-o da direcção que facilita a magnetização. De forma progressiva, a resultante dos momentos magnéticos dos grãos pode variar de forma aleatória por acção da energia térmica e a magnetização diminui. Esta teoria aplica-se apenas a grãos de dimensões muito reduzidas e uniformemente magnetizados. Os grãos muito finos, com dimensão inferior a um valor crítico, exibem um comportamento magnético instável, designado superparamagnetismo. Para dimensões acima desse valor crítico, um grão uniformemente magnetizado é muito estável e constitui aquilo que se designa por um domínio singular³.

Na magnetite este valor crítico varia entre 0,03 a 0,1 μm , para grãos equidimensionais, até 1 μm , para grão alongados. Na hematite este valor é superior, variando entre 0,03 e 15 μm .

O comportamento típico de um domínio singular é condicionado pela dimensão dos grãos. Quando um grão é suficientemente grande, a energia magnética associada à sua magnetização torna-se demasiadamente grande para que a sua magnetização permaneça uniforme, já que o campo desmagnetizante de um grão uniformemente magnetizado (Fig.5.5), interage com a magnetização espontânea, gerando energia autodesmagnetizante (magnetostática). Para reduzir esta energia, a

² $K = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ (Lowrie).

³ *No original, single domain.*

magnetização subdivide-se em unidades de menores dimensões uniformemente magnetizadas, designadas por domínios de *Weiss*.

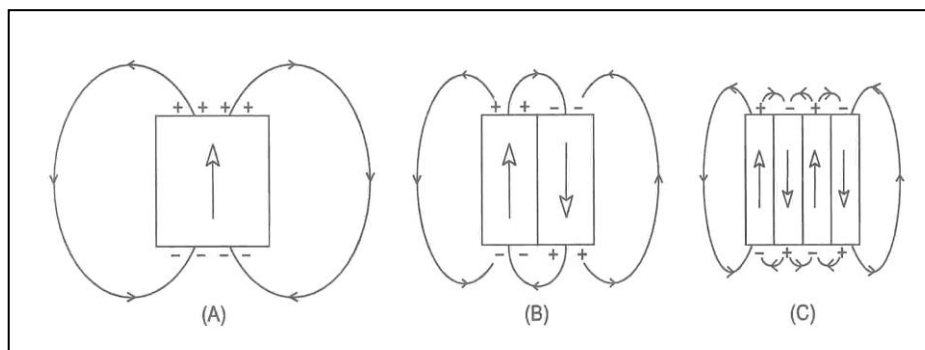


Figura 5.5 - Subdivisão da magnetização uniforme de (A) um grão em (B) dois domínios magnéticos com magnetização oposta e (C) quatro domínios magnéticos com magnetização oposta (Lowrie, 1997).

No caso mais simples a magnetização divide-se em dois domínios com magnetizações orientadas em sentidos opostos. A magnetização total anula-se e a energia autodesmagnetizante reduz-se em cerca de metade. Num grão com n domínios, cuja magnetização espontânea se oriente de forma oposta e alternante, a energia autodesmagnetizante reduz-se de um factor $1/n$. Nestas condições os domínios encontram-se separados entre si por regiões muito mais finas que os domínios, com cerca de $0,1 \mu\text{m}$ de espessura. Estas regiões são designadas por paredes dos domínios de *Bloch*⁴.

Sob a influência de um campo magnético externo, a magnetização de um grão multi-domínio pode ser modificado movendo as posições das paredes dos seus domínios, provocando o aumento da dimensão de alguns desses domínios e a diminuição de outros. Se o campo for suficientemente forte, todas as paredes poderão mover-se e o grão dir-se-á magneticamente saturado. Consequentemente, é mais fácil modificar a magnetização de um grão multi-domínio que a de um grão em domínio singular, ou seja, os grãos multi-domínios são menos estáveis, do ponto de vista da magnetização remanescente, que os grãos em domínio singular.

⁴ No original, *bloch domain walls*.

5.2.3- Magnetismo terrestre

No que se refere a prospecção geofísica, o campo magnético terrestre resulta de três componentes: o campo magnético principal (com origem no interior da Terra, de variações suaves e de período longo), um campo de fraca intensidade (quando comparado com o campo principal) com origem exterior à Terra, caracterizado por variações rápidas e período menor, e uma terceira componente relacionada com as variações (no espaço) do campo principal. Esta última componente é quase constante no tempo, para um dado local, e tem origem nas anomalias magnéticas locais subsuperficiais da crosta terrestre, constituindo por isso o objectivo principal da prospecção magnética.

A direcção e a intensidade do campo magnético terrestre, ou campo geomagnético, variam com a latitude, a longitude e no tempo.

Estas variações do campo principal podem ser calculadas através de equações, que resultam no *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF), permitindo representações próximas da realidade em áreas onde o campo magnético tenha sido convenientemente estudado. Em contrapartida, em áreas acerca das quais exista pouca informação, poderão verificar-se discrepâncias que podem atingir 250 nT. As variações no tempo, em particular variações seculares, não podem antecipar-se se não por extrapolação dos conhecimentos do passado, pelo que o IGRF é actualizado e revisto, do ponto de vista retrospectivo, dez em dez anos, com o intuito de se obter um modelo definitivo global (Milsom, 1996).

Uma agulha magnética, ao deslocar-se livremente, orienta-se relativamente ao campo magnético, fazendo geralmente um ângulo com a vertical e um ângulo com o norte geográfico. O vector do campo magnético representado pela agulha magnética pode ser descrito através dos elementos geomagnéticos (Fig.5.6).

O vector campo magnético total (B) pode ser descrito em termos de uma componente vertical (ΔZ) e de uma componente horizontal (ΔH) segundo direcção do norte magnético. O ângulo vertical (I) definido por B e pelo plano horizontal designa-se por inclinação do campo magnético e o ângulo horizontal (D) entre o norte magnético e o norte geográfico designa-se por declinação magnética.

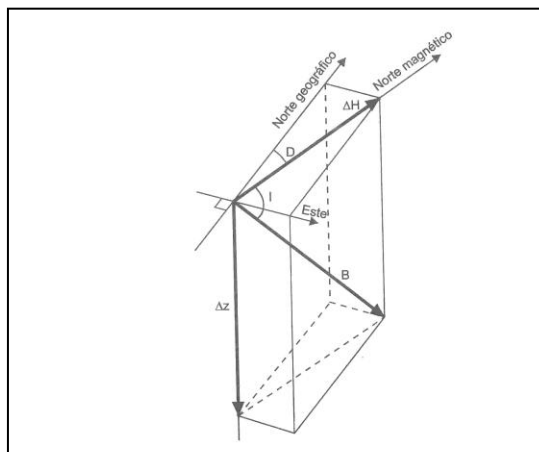


Figura 5.6- Os elementos geomagnéticos: I a inclinação do campo magnético, D a declinação magnética e B o vector campo magnético total (adaptado de Reynolds, 1997).

Estes elementos podem ser representados a duas dimensões, sob a forma de mapas, genericamente designados por mapas isomagnéticos. Em particular, os mapas que representam linhas de igual declinação magnética designam-se mapas isogónicos, os que representam linhas de igual inclinação designam-se mapas de isoinclinação e os mapas que representam linhas de igual intensidade do campo magnético designam-se mapas isodinâmicos.

No hemisfério norte a agulha magnética geralmente inclina para baixo e aponta em direcção ao norte, assumindo a vertical no pólo norte magnético (Fig. 5.7).

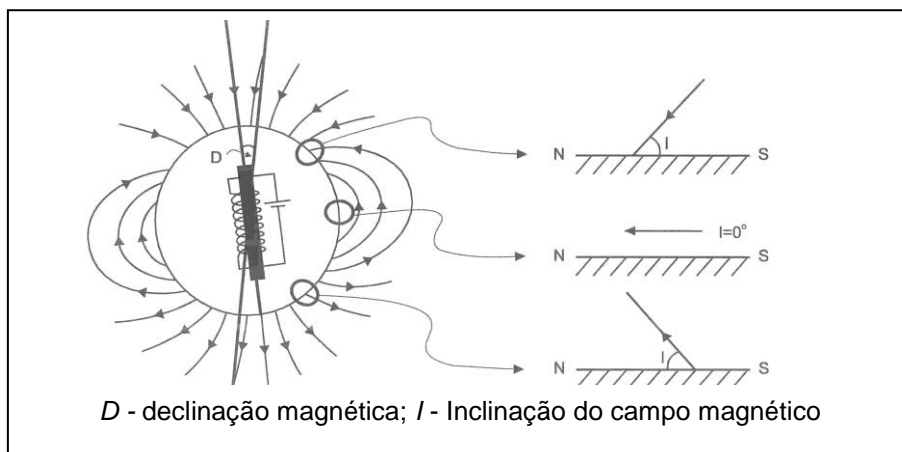


Figura 5.7- Variação da inclinação do campo magnético total com a latitude (Reynolds, 1997).

No hemisfério sul a agulha geralmente inclina para cima e aponta em direcção ao norte. A linha definida pelas posições em que a agulha se posiciona horizontalmente designa-se por equador

magnético e aproxima-se do equador geográfico⁵. A componente vertical do campo magnético é positiva a norte desta linha e negativa a sul.

A intensidade do campo magnético total varia desde cerca de 25000 nT, nas regiões equatoriais, até cerca de 70000 nT, nos pólos (Kearey & Brooks, 1991), enquanto a intensidade da componente vertical do campo magnético terrestre varia desde 30000 nT, no equador magnético, até 60000 nT nos pólos magnéticos (Reynolds, 1997).

O campo geomagnético não reflecte as variações da geologia subsuperficial⁶, o que indica que a sua origem é profunda. Em termos comparativos, o campo geomagnético assemelha-se ao campo gerado por um dipolo electromagnético simples cujos os pólos se localizam aproximadamente nas posições 75° N, 101° W e 69° S, 145° E. Este dipolo encontra-se deslocado cerca de 300 km do centro da Terra, em direcção a Indonésia e o seu eixo tem uma inclinação de cerca de 11,5° relativamente ao eixo de rotação da Terra. No entanto, o campo geomagnético é de facto mais complexo e as posições em que a agulha magnética se verticaliza localizam-se nos pontos 75° N, 101° W e 67° S, 143° E (Telford *et al.*, 1990)⁷.

Além destes é possível que existam outros locais onde a agulha magnética se verticalize devido à existência de anomalias locais (Parasnis, 1997).

O campo magnético principal é, na quase totalidade, originado no interior da Terra. A teoria aceite actualmente relaciona-o com a existência de correntes de convecção de material condutor, no núcleo externo⁸ (Fig. 5.8), este núcleo composto por ferro e níquel, comportar-se-á como um dínamo auto-regulável.

⁵ Com latitudes sempre inferiores a 15° (Telford *et al.*, 1990).

⁶ Cadeias de montanhas, *rifts* oceânicos ou arcos sísmicos.

⁷ Segundo Parasnis (1997) localizam-se nas posições 72° N, 102° W e 68° S, 146° E; segundo Lowrie (1997). Localizam-se nas posições 77,3° N, 101,8° W e 65,6° S, 139,4° E.

⁸ Entre os 2 800 aos 5000 km de profundidade (Telford *et al.*, 1990).

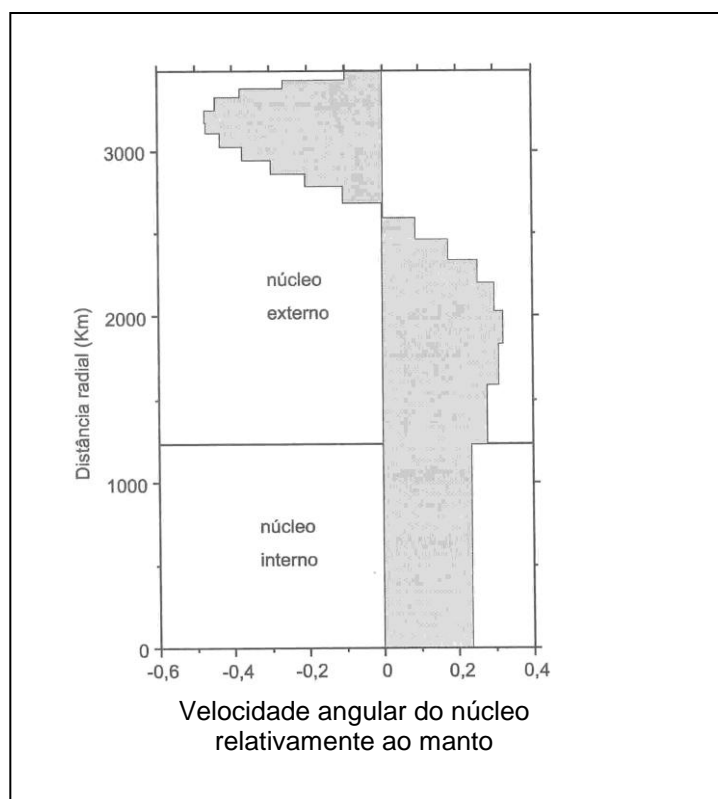


Figura 5.8 - Interpretação da velocidade das correntes de convecção no núcleo terrestre relativamente ao manto (Watanabe & Yukutake, 1975).

Os registos paleomagnéticos mostram que o campo geomagnético manteve o eixo próximo do eixo de rotação da Terra, indiciando que as correntes convectivas se relacionam com o movimento de rotação da Terra. No entanto, ao longo dos últimos quatrocentos anos, a sua inclinação mudou cerca de 10° e a declinação magnética mudou cerca de 35° . Estas variações podem estar relacionadas com mudanças nas correntes de convecção do núcleo. Além destas variações têm ocorrido, também, inversões da sua direcção.

Uma pequena parte do campo geomagnético parece relacionar-se com correntes eléctricas nas camadas ionizadas da alta atmosfera. Esta componente apresenta variações temporais muito mais rápidas que aquelas descritas anteriormente para o campo magnético principal. Nestas variações enquadram-se segundo (Telford *et al.*, 1990):

- um ciclo com a duração de onze anos, correlacionável com actividade solar;

- as variações com um período de 24 horas e uma amplitude da ordem dos 30 nT. Estas variações dependem da latitude e da estação do ano e são provavelmente controladas pela acção dos ventos solares sobre as correntes ionosféricas;
- as variações com um período de 25 horas e uma amplitude da ordem de 2 nT. Além deste período, estas variações exibem um comportamento cíclico mensal mais alargado e parecem estar associadas com a interação entre a Lua e a ionosfera;
- as tempestades magnéticas com amplitudes até 1000 nT. Estas tempestades podem atingir intensidades superiores nas regiões polares, originando as auroras boreais. Frequentemente ocorrem com intervalos de 27 dias e correlacionam-se com a actividade solar.

As variações magnéticas locais do campo geomagnético resultam das variações do conteúdo em minerais magnéticos das rochas da crosta. Estas anomalias geralmente ocupam áreas pouco extensas e as suas causas deverão ser pouco profundas, já que para profundidades superiores a cerca de 40 km, a temperatura atinge o ponto de Curie, a partir do qual as rochas perdem as suas propriedades magnéticas (Telford *et al.*, 1990).

5.2.4- Propriedades magnéticas das rochas

A maioria dos minerais constituintes das rochas (silicatos e carbonatos, ambos diamagnéticos) possuem fraca susceptibilidade magnética e as características magnéticas que as rochas geralmente exibem são devidas à pequena proporção de minerais magnéticos que incorporam na sua composição. Esses minerais advêm de dois grupos geoquímicos: o grupo dos óxidos de ferro e titânio e o grupo do ferro-enxofre. Quanto ao primeiro, incorpora uma série⁹ de minerais magnéticos, desde a magnetite (Fe_2O_4) à ulvospinel (Fe_2TiO_4). A hematite¹⁰ (Fe_2O_3) é antiferromagnética e portanto não origina anomalias magnéticas, a menos que se proporcionem condições para o desenvolvimento de antiferromagnetismo parasítico.

⁹ Série da titanomagnetite.

¹⁰ Série da titanohematite.

Quanto ao grupo de ferro-enxofre, incorpora a pirrotite (FeS_{1+x} com $0 < x < 0,15$), cuja susceptibilidade magnética depende da sua composição.

A magnetite, que possui uma temperatura de Curie de $578\text{ }^{\circ}\text{C}$, é a mais abundante dos minerais referidos, justificando razoavelmente que o comportamento magnético das rochas se classifique em termos do seu conteúdo em magnetite.

As rochas ígneas básicas e ultrabásicas, regra geral, apresentam susceptibilidades magnéticas elevadas devido ao seu teor relativamente elevado em magnetite (Tabela 5.3).

A proporção de magnetite nas rochas ígneas tende a diminuir com o aumento de acidez, pelo que as rochas ígneas ácidas apresentam habitualmente susceptibilidades magnéticas inferiores às das rochas básicas. As rochas metamórficas também exibem susceptibilidades variáveis, intermédias a baixas, enquanto as rochas sedimentares apresentam susceptibilidades geralmente muito baixas (Reynolds, 1997). De facto, a maior parte das anomalias observadas em zonas sedimentares são devidas ao seu substrato ígneo ou metamórfico, ou a existência de intrusões nos sedimentos (Kearey & Brooks, 1991).

Para além da composição mineralógica, a susceptibilidade magnética das rochas pode variar de acordo com outras características. A dimensão, a forma dos grãos e o modo como estes se encontram distribuídos nas rochas, afectam a sua susceptibilidade.

Se os minerais magnéticos se encontram alinhados, como acontece por vezes algumas rochas sedimentares e metamórficas, pode desenvolver-se uma anisotropia magnética vincada (Lourenço *et al.*, 2006).

Tabela 5.3- Susceptibilidade magnética (K) de rochas e minerais (adaptado de (Reynolds, 1997), (Parasnis, 1997), (Telford *et al.*, 1990), (Sharma, 1986) e (Kearey & Brooks, 1991)).

Minerais ou rochas	Susceptibilidade ($k \times 10^{-6}$)
Sedimentares	
Arenito	0 a 21 000
Calcário	10 a 25 000
Dolomite impura	20 000
Dolomite pura	-12,5 a 44
Xistos argilosos	60 a 18 600
Metamórficas	
Ardósia	0 a 38 000
Gneísse	125 a 25 000
Mármore	-9,4
Serpentinito	3100 a 75 000
Xistos	315 a 3 000
Ígneas	
Basaltos	500 a 182 000
Basaltos oceânicos	300 a 36 000
Gabro	800 a 90 000
Granito	10 a 65
Granito com magnetite	20 a 50 000
Pegmatito	3 000 a 75 000
Peridotito	95500 a 196 000
Riólito	250 a 37 000
Minerais	
Anidrite	-14,1
Calcopirite	400
Gelo (d)	-9
Gesso (d)	-13
Grafite (d)	-80 a -200
Halite (d)	-10,3
Hematite (m)	420 a 38 000
Ilmenite (m)	314 000 a $3,8 \times 10^6$
Magnetite	70 000 a 2×10^7
Pirite (m)	50 a 5 000
Pirrotite (m)	1250 a $6,3 \times 10^6$
Quartzo (d)	-15

(d) material diamagnético; (m) minério .Os valores da susceptibilidade encontram-se expressos no sistema SI. Para os converter no sistema CGS devem dividir-se por 4π

As causas mais frequentes das anomalias magnéticas incluem a presença de diques, falhas, soleiras e rochas lávicas, intrusões básicas maciças e mineralizações ricas em magnetite. A intensidade dessas anomalias varia desde poucas dezenas de nT, em substrato metamórfico profundo, até várias centenas de nT, sobre intrusões básicas, podendo atingir vários milhares de nT sobre mineralizações ricas em magnetite.

Capítulo 6. Processamento dos dados magnéticos e imagens de satélite.

6.1. Imagens de satélite

A partir de imagens do *Google Earth*, foi elaborado o mosaico da área em estudo (Fig. 6.1) que serviu de base para as imagens aerogeofísicas durante a fase de integração com os dados geofísicos. As imagens que constituem o mosaico, foram devidamente georreferenciadas usando o método de quatro pontos conhecidos. Para a elaboração do mosaico (georreferenciação) recorreu-se aos programas *Adobe Photoshop 7.0* e *ArcGIS 9.2*. Deste mosaico foram extraídas as imagens das (figuras 6.2 e 6.3), para ilustrar as estruturas possíveis de serem cartografadas a partir de imagens de satélites.

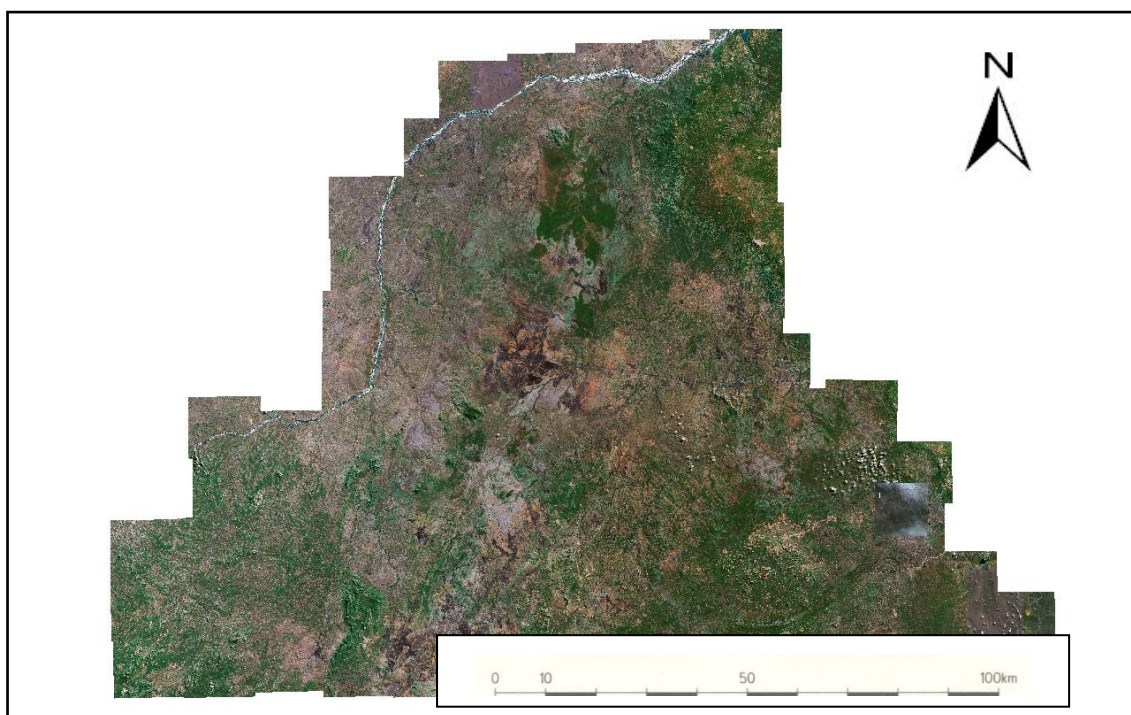


Figura 6.1- Mosaico da área de estudo elaborado a partir de imagens de satélite do *Google Earth*

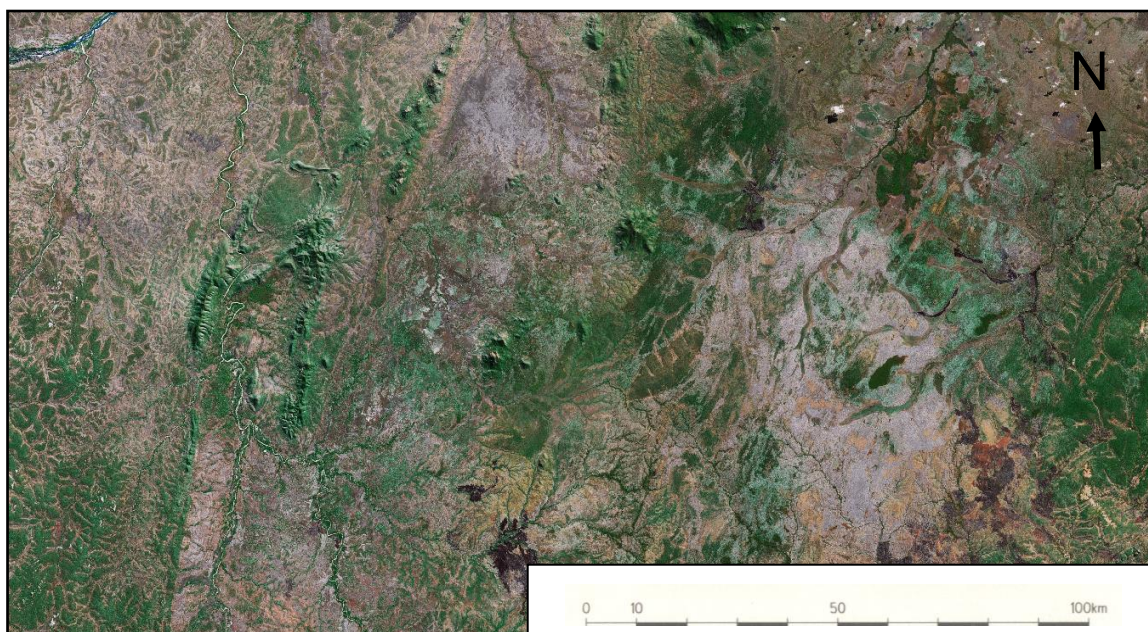


Figura 6.2 - Parte do mosaico da área de estudo, elaborado a partir de imagens de satélite fornecidas pelo *Google Earth*, ilustrando linhas de drenagem, zonas com afloramentos. Nesta imagem dá-se destaque ao corpo circular no centro da imagem e à alteração ferruginosa claramente visível no canto inferior directo da imagem.

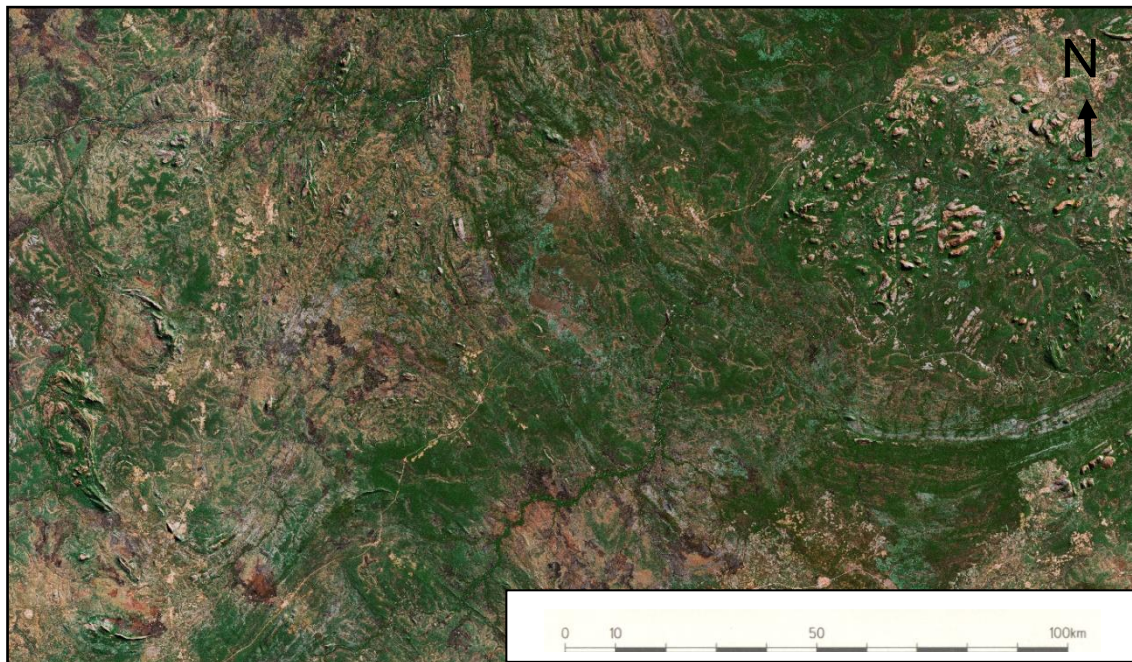


Figura 6.3- Parte do mosaico da área de estudo, elaborado a partir de imagens de satélite do *Google Earth*. A partir desta imagem pode-se ver estruturas circulares que afloram no lado esquerdo desta imagem, afloramentos de rochas no canto superior direito. Nesta imagem são também bem visíveis dobras, falhas, vias de acessos.

6.2. Processamento dos dados aeromagnéticos

No processamento dos dados foi tida em consideração uma abordagem regional com geração das imagens aerogeofísicas na escala 1:1000000. As imagens aerogeofísicas foram fundamentais na interpretação e na integração de dados para que se pudesse alcançar diferentes níveis de visualização e extrair a maior quantidade de informações. A qualidade do processamento pode influenciar a interpretação dos produtos finais, pois as feições estruturais ou as diferenças litológicas podem ser ofuscadas ou mascaradas em um produto de baixa qualidade.

O tamanho da célula unitária das malhas foi definido como sendo $\frac{1}{4}$ do espaçamento entre as linhas de voo para evitar a perda de informação durante o processamento. Como se trata de dados de alta resolução o espaçamento entre as linhas de voo é de 300 m o que implicou a utilização do tamanho de célula unitária de 75 m.

Para um tamanho de célula de 75 metros, o método de interpolação que apresentou melhores resultados para os dados gamaespectrométricos foi o da Mínima Curvatura. Para os dados magnetométricos o método Bi-direcional e *Krigagem* são os mais adequados.

O método da Mínima Curvatura, utiliza *splines* bidimensionais para medir os dados na direcção das linhas de produção em uma malha regular, gerando uma superfície suavizada com os valores mais próximo possível dos valores originais (Geosoft, 1995).

O método Bi-direcional baseia-se na interpolação na direcção das linhas de voo, pelo método *splines* cúbicos em um intervalo igual ao espaçamento da célula, e aplicação de um filtro passa-baixa para remover os picos e falseamento. Posteriormente a interpolação é perpendicular a direcção das linhas de controlo, o que cria nós. O método Bi-direcional, é frequentemente escolhido por ser o mais rápido no processamento, foi o método utilizado nesta dissertação para o processamento dos dados aeromagnéticos.

No processamento, interpretação e integração dos dados aerogeofísicos, foram utilizados os seguintes programas: *Oasis montaj-Educacional* versão 7.0 da Geosoft, *ArcGIS 9.2* e *Adobe Photoshop 7.0*.

6.2.1-Gradiente horizontal

Gradiente horizontal é uma técnica mais simples, uma vez que não usa a derivada vertical e é independente da direcção do campo magnético regional, da magnetização da fonte e do mergulho do contacto. Os dados magnéticos processados a partir desta técnica dão informação acerca da profundidade dos corpos anómalos. É a partir do mapa do campo magnético anómalo (Fig.6.4) que são aplicadas as outras técnicas de processamento de dados magnéticos.

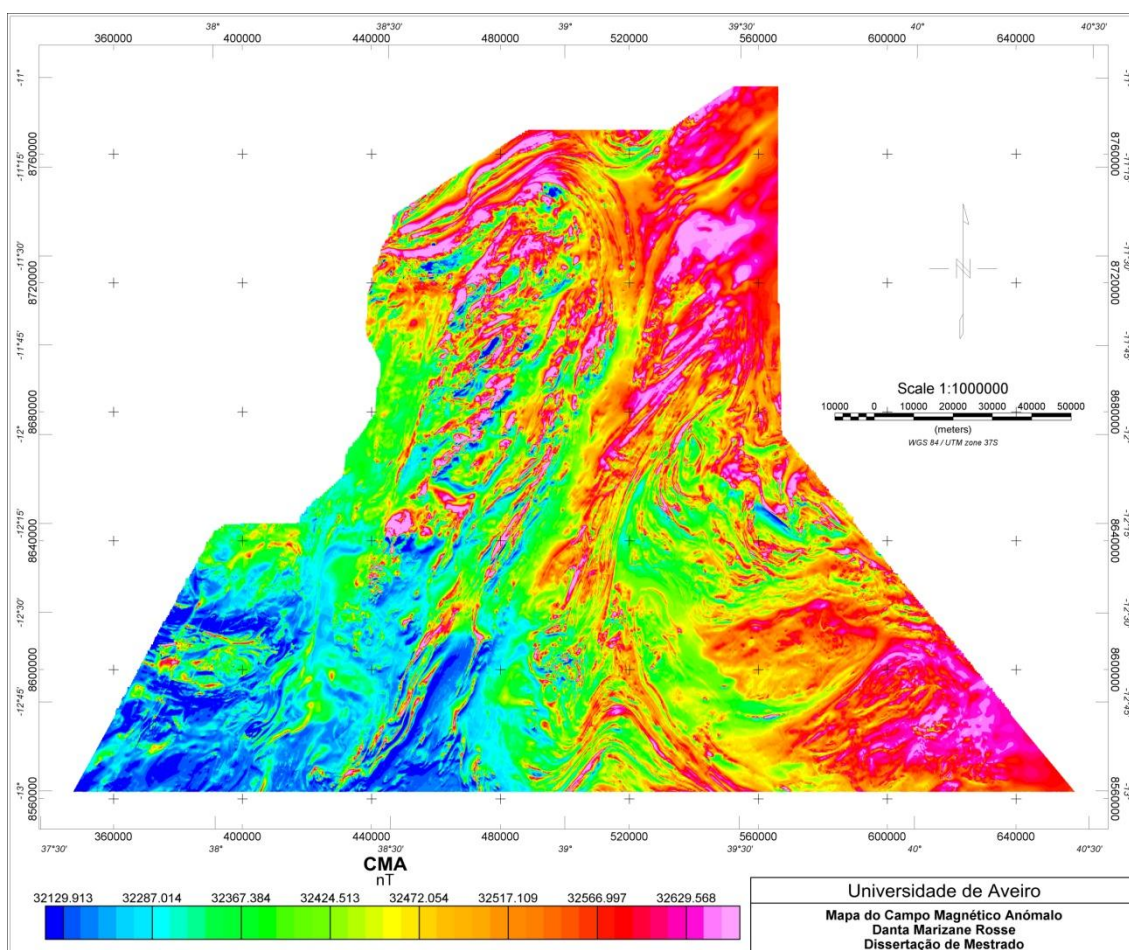


Figura 6.4 – Mapa de anomalias do campo magnético anómalo (CMA) corrigido.

6.2.2- Sinal analítico (AS)

Este filtro converte a grelha das medidas colectadas de uma anomalia bipolar em uma outra grelha equivalente à mesma anomalia, porém monopolar, facilitando a interpretação dos limites do corpo que gerou a anomalia.

De facto, este processo , constitui uma derivada nos três eixos (x, y e z) e é de grande utilidade quando se deseja visualizar a geometria real da anomalia magnética (Fig. 6.5).

A noção de sinal analítico foi definida inicialmente como um “campo complexo derivado de um campo potencial” (Nabighian, 1972). Este método não requer um conhecimento prévio da direcção de magnetização e não necessita do processamento de redução ao pólo (Hsu *et al.*,1996).

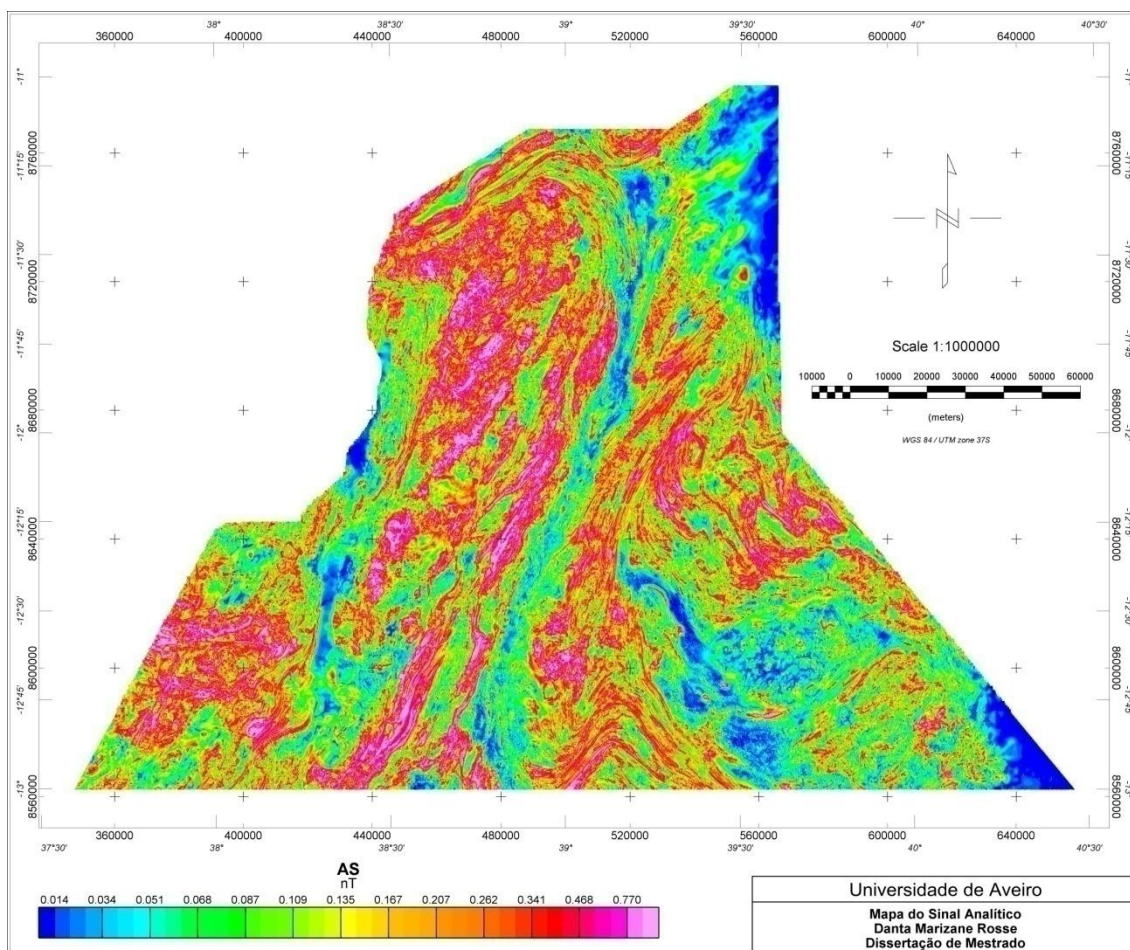


Figura 6.5 - Mapa de sinal analítico da área em estudo produzido a partir do mapa de anomalias do campo magnético anómalo (CMA) apresentado na figura 6.4, realçando a geometria real da anomalia magnética.

6.2.3- Redução ao pólo

O uso de um mapa de redução ao pólo (Fig. 6.7), consiste em fazer com que a anomalia magnética seja independente da direcção do corpo litológico, já que esta é uma das características que os corpos apresentam quando estão situados em pólos magnéticos. Para realizar este procedimento da transferência da anomalia, é necessário obter dados físicos como a inclinação magnética, a declinação magnética e o campo total. Para perceber melhor o efeito da redução ao pólo, claramente observável na (Fig. 6.6A), apresenta-se para comparação o perfil de uma anomalia magnética nas coordenadas do levantamento e o perfil da anomalia reduzida ao pólo numa determinada região (Fig. 6.6B).

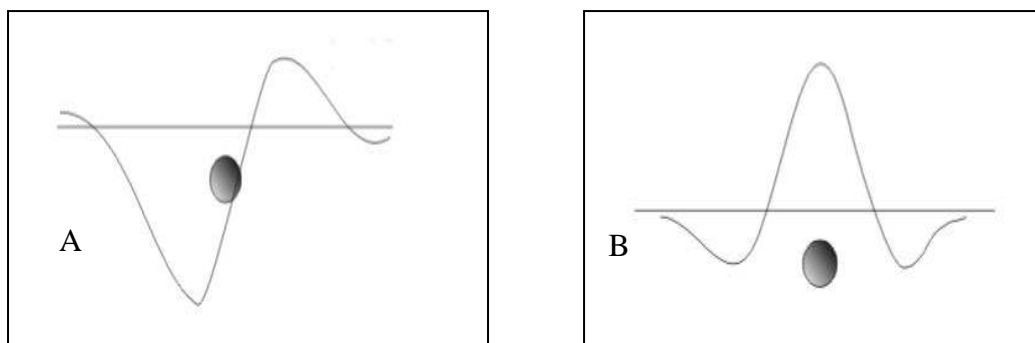


Figura 6.6 - Anomalia magnética (A) nas coordenadas do levantamento (B) reduzida ao pólo.

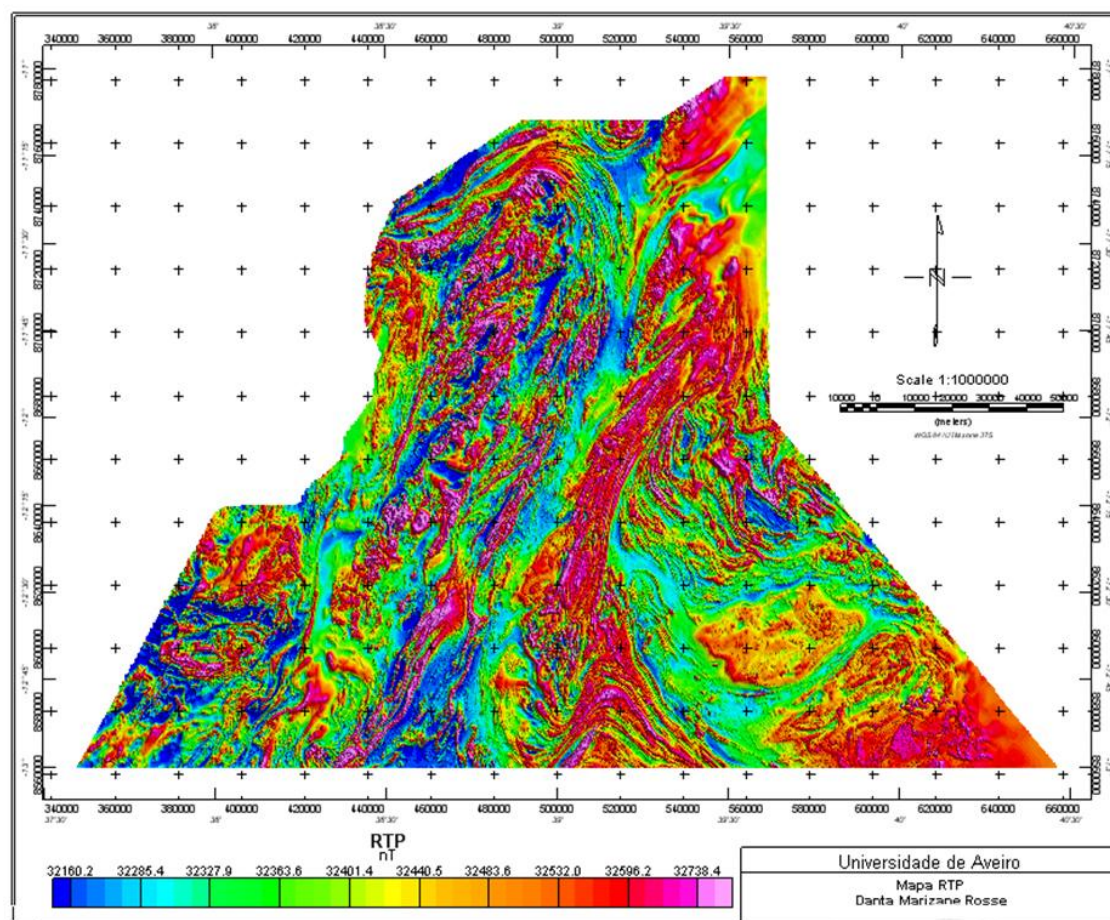


Figura 6.7– Mapa redução ao pólo (RTP) da área de estudo produzido a partir do mapa de anomalias do Campo Magnético Anómalo (CMA) da figura 6.4, realçando a geometria real da anomalia magnética.

6.2.4 - Primeira derivada vertical

É um procedimento teórico matemático que é aplicado com o intuito de destacar as estruturas geológicas (Fig. 6.8) para uma posterior interpretação.

A primeira derivada vertical é a amplitude do espectro da anomalia multiplicado pela ordem da derivada, neste caso é da primeira (1ª) ordem. Consiste em medir o campo magnético de dois pontos próximos, subtraindo-os e dividindo o resultado pela separação vertical entre os pontos.

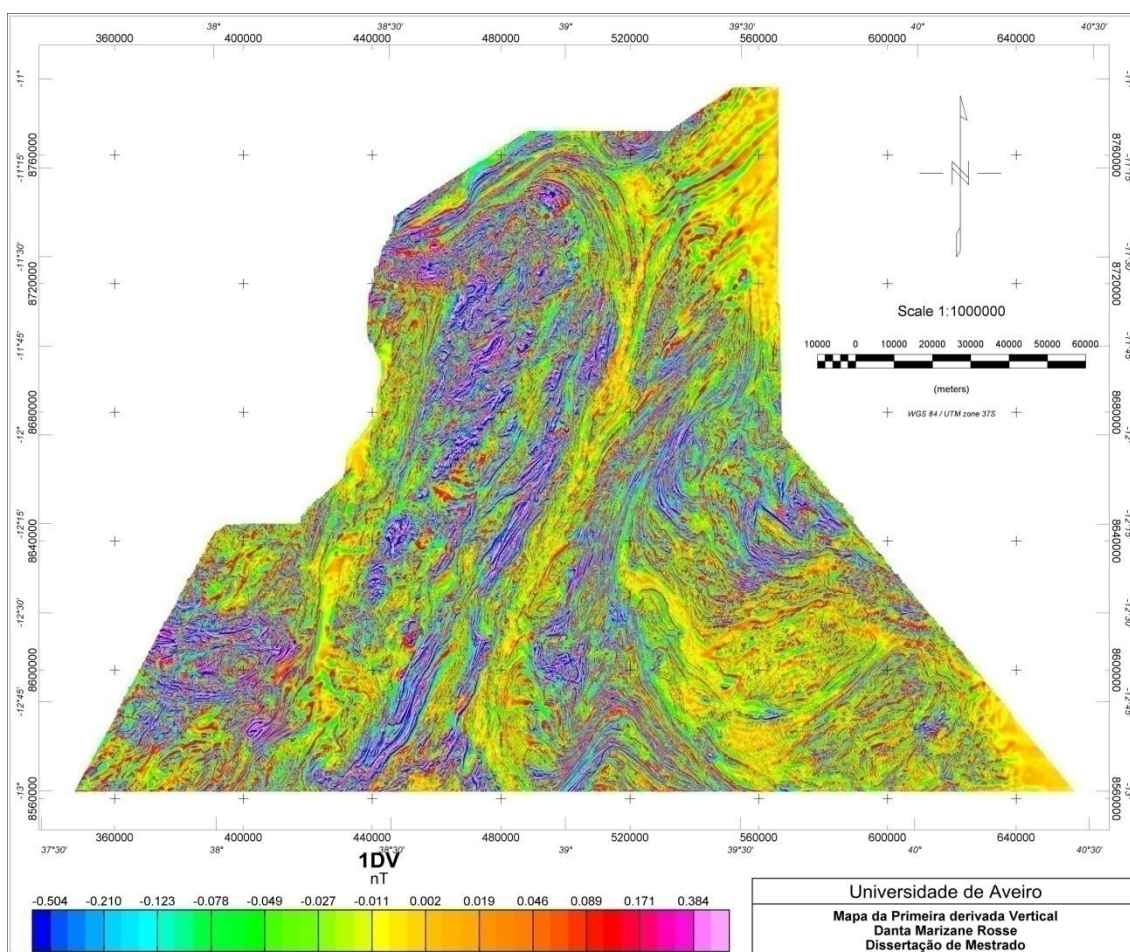


Figura 6.8 – Mapa da primeira derivada Vertical (1ªDV) da área de estudo produzido a partir do mapa do campo magnético anómalo (CMA) apresentado na figura 6.4, realçando as estruturas geológicas.

6.2.5 - Segunda derivada vertical

A segunda derivada vertical não é nada mais que o gradiente vertical da primeira derivada, procedendo-se da mesma maneira como na primeira derivada só que agora aplicado sobre a segunda (2ª) ordem.

6.2.6 - Deconvolução de Euler

Esta técnica foi aplicada para estimar as profundidades do topo de fontes magnéticas. Teve como base a elaboração dos mapas para diferentes índices estruturais. É importante referir que um dos grandes problemas nas geociências é encontrar uma técnica mais precisa nas suas interpretações capaz de auxiliar com

êxito a investigação da geologia subsuperficial, com base nas anomalias do campo magnético da Terra, resultantes das propriedades magnéticas do subsolo.

Não obstante a maioria dos minerais que formam as rochas não serem magnéticos, alguns tipos de rochas ou materiais geológicos contêm minerais magnéticos suficientes para produzirem anomalias magnéticas significativas, incluindo objectos ferrosos (condutas, cabos e objectos metálicos, materiais de artilharia soterrados, contentores metálicos soterrados) com origem na actividade humana.

Dados magnéticos têm uma grande aplicação no mapeamento de fontes magnéticas, assim como estimar as profundidades que eles se encontram; sendo destacados quatro técnicas de cálculo, nomeadamente: Sinal analítico, o gradiente horizontal, redução ao pólo já referidos anteriormente e Deconvolução *Euler*.

Diferentemente das outras técnicas, a Deconvolução *Euler*, não assume como premissa um modelo geológico particular, sendo necessário testar diferentes modelos, de forma a encontrar o modelo real adequado para a fonte magnética causadora de anomalia. Das técnicas aqui abordadas, todas elas podem ser aplicadas a qualquer grelha ou banco de dados mas há que destacar inicialmente a técnica de Deconvolução *Euler*, na análise de mapas de dados magnéticos.

O grau de homogeneidade é interpretado como sendo o índice estrutural (*SI*), denominado cientificamente por taxa de decaimento da anomalia com a distância entre a fonte e o campo de medida, sendo um indicador referente á forma geométrica da fonte magnética. São conhecidos quatro índices estruturas (Tabela 6.1).

Tabela 6.1 - Principais índices estruturais aplicados.

Índice estrutural (<i>SI</i>)	Forma geométrica da fonte anómala
0	Contacto
1	Dique vertical ou soleira
2	Cilindro horizontal ou vertical
3	Esfera ou dipolo

Na figura 6.9 apresenta-se as interpretações ideais dos índices estruturais sobre os dados aeromagnéticos, segundo as quais as soluções que se encontram a direita representam os índices estruturais correctos (índices 2 e 1) para os *pipe* vertical ou corpos magnéticos em cima da figura e em baixo da mesma para os diques respectivamente. Esta figura mostra que, um índice muito baixo dá profundidades menores. Quando o índice é muito elevado, dá estimativas de profundidade muito elevada. Mas mesmo assim, se o índice está correcto, é lógico que a estimativa de profundidades são mais precisas para índices estruturais elevados do que os baixo índice (Reid *et al.*, 1990).

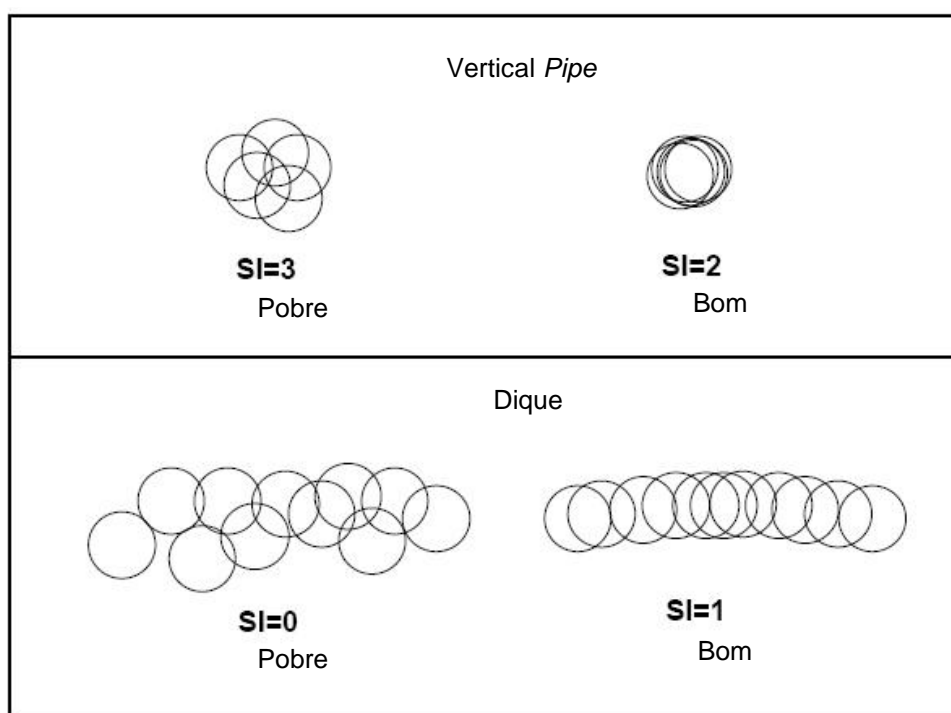


Figura 6.9 - Interpretações ideais dos índices estruturais sobre os dados aeromagnéticos (Reid *et al.*, (1990).

A fim de produzir mapas de soluções e alcançar os objectivos da técnica de Deconvolução *Euler* (cálculo e interpretação das estimativas de profundidade), foi elaborada a Tabela 6.2, que apresenta um conjunto de parâmetros que foram processados segundo a equação de homogeneidade de *Euler*, um dos parâmetros é a estimativa de profundidade.

Tabela 6.2 – Tabela referente ao processamento de dados segundo equação de homogeneidade *Euler*.

✓ Solutions	X	Y	X Euler	Y Euler	Depth	Backgrnd	WndSize	dZ	dXY	X Offset	Y Offset
0.0	353212.50	8562862.00	352916.69	8562701.00	338.12	32196.97	1500.00	6.62	13.85	-295.81	-161.00
1.0	353287.50	8562862.00	353067.66	8562712.00	329.69	32198.54	1500.00	7.35	14.88	-219.84	-150.00
2.0	353362.50	8562862.00	353203.13	8562705.00	330.82	32199.01	1500.00	7.39	15.03	-159.38	-157.00
3.0	353437.50	8562862.00	353307.81	8562679.00	337.53	32199.65	1500.00	7.33	14.96	-129.69	-183.00
4.0	353512.50	8562862.00	353367.78	8562658.00	350.69	32201.19	1500.00	6.82	14.41	-144.72	-204.00
5.0	353587.50	8562862.00	353476.97	8562692.00	255.11	32207.89	1500.00	8.39	18.94	-110.53	-170.00
6.0	353662.50	8562862.00	353682.34	8562764.00	238.55	32204.94	1500.00	9.42	20.06	19.84	-98.00
7.0	353737.50	8562862.00	353788.69	8562801.00	221.51	32201.92	1500.00	9.92	21.18	51.19	-61.00
8.0	353812.50	8562862.00	353892.06	8562818.00	201.40	32197.95	1500.00	10.99	23.10	79.56	-44.00
9.0	353887.50	8562862.00	353968.59	8562842.00	210.96	32194.12	1500.00	10.64	22.17	81.09	-20.00
10.0	353962.50	8562862.00	354035.81	8562874.00	203.28	32193.26	1500.00	10.56	22.05	73.31	12.00
11.0	354037.50	8562862.00	354142.56	8562921.00	195.96	32192.38	1500.00	10.07	21.14	105.06	59.00
12.0	354112.50	8562862.00	354260.13	8562968.00	213.24	32190.84	1500.00	8.20	17.63	147.63	106.00
13.0	354187.50	8562862.00	354317.94	8562983.00	217.18	32193.91	1500.00	7.28	16.10	130.44	121.00
14.0	354262.50	8562862.00	354388.16	8563020.00	181.28	32206.54	1500.00	8.01	18.13	125.66	158.00
15.0	354337.50	8562862.00	354509.53	8563065.00	142.74	32223.38	1500.00	8.49	20.18	172.03	203.00
16.0	361012.50	8562862.00	361188.88	8563067.00	301.38	32218.59	1500.00	7.95	21.96	176.38	205.00
17.0	361087.50	8562862.00	361260.47	8563088.00	305.41	32226.89	1500.00	7.74	21.48	172.97	226.00
18.0	361162.50	8562862.00	361377.97	8563118.00	305.92	32234.88	1500.00	7.42	21.16	215.47	256.00
19.0	363187.50	8562862.00	362975.28	8563331.00	417.39	32187.55	1500.00	4.17	11.05	-212.22	469.00
20.0	363262.50	8562862.00	363004.59	8563338.00	392.03	32191.16	1500.00	4.40	11.31	-257.91	476.00
21.0	363337.50	8562862.00	363141.78	8563352.00	374.65	32191.31	1500.00	4.69	11.52	-195.72	490.00
22.0	363412.50	8562862.00	363323.41	8563361.00	373.42	32190.54	1500.00	4.55	10.71	-89.09	499.00
23.0	363487.50	8562862.00	363454.75	8563363.00	382.94	32190.15	1500.00	4.44	10.01	-32.75	501.00
24.0	363562.50	8562862.00	363535.00	8563351.00	395.73	32186.72	1500.00	4.47	9.88	-27.50	489.00
25.0	363637.50	8562862.00	363576.00	8563340.00	397.90	32182.67	1500.00	4.58	9.96	-61.50	478.00
26.0	363712.50	8562862.00	363612.50	8563300.00	366.76	32176.28	1500.00	5.05	10.81	-100.00	438.00
27.0	363787.50	8562862.00	363683.50	8563214.00	297.74	32166.17	1500.00	6.01	13.06	-104.00	352.00
28.0	363862.50	8562862.00	363792.88	8563130.00	254.74	32156.54	1500.00	6.84	14.68	-69.63	268.00
29.0	363937.50	8562862.00	363873.88	8563075.00	239.02	32152.68	1500.00	7.24	15.16	-63.63	213.00

A Tabela 6.2 referente ao processamento de dados segundo equação de homogeneidade de *Euler* tem como principais colunas: “*solutions*”: linha de voo; “X,Y”: coordenadas para uma dada posição do campo total (T); “X_*Euler*, Y_*Euler*”: coordenadas referentes à posição da fonte magnética; “*Depth*”: referente ao valor (Z-Zo) da equação de homogeneidade (programada no *software*), correspondente ao valor de profundidade da área de estudo; “*Background*”: valor regional (B) do campo total (T), com base na equação de homogeneidade; “*Window size*”: (dimensão da janela usada, multiplicada pelo espaçamento da malha regular); “X_*Offset*, Y_*Offset*”: diferença entre as coordenadas (X_*Euler*, Y_*Euler*) e (X,Y); quanto maior o valor da diferença, maior é a susceptibilidade de erro de cálculo devido à maior distância entre os pontos.

O Oasis montaj é um *software*, muito complexo e muito flêxivel permitindo ao analista de imagens fazer uma interligação dos dados em sua posse durante a fase de processamento e interpretação. Na figura 6.10 pode se constatar a dinâmica que o *software* permite durante o processamento e interpretação.

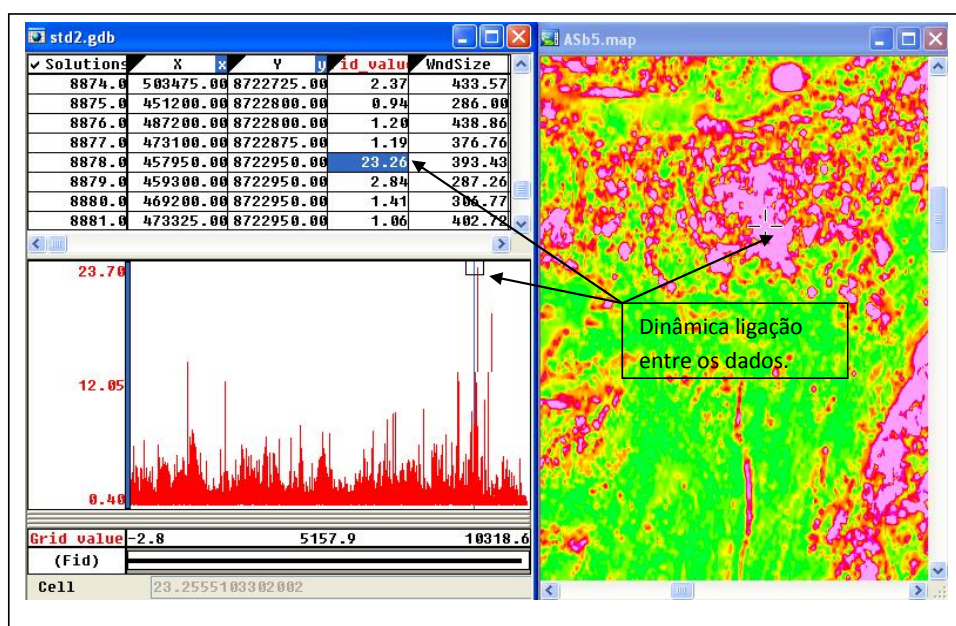


Figura 6.10 - Ligação dinâmica entre o banco de dados *Euler*, perfil da coluna *grid value* e o mapa do sinal analítico tornando fácil a interpretação.

As figuras 6.11, 6.13, 6.14 e 6.15, relativas aos mapas de soluções *Euler*, foram produzidas obedecendo criteriosamente os requisitos do método Deconvolução *Euler* do Oasis montaj.

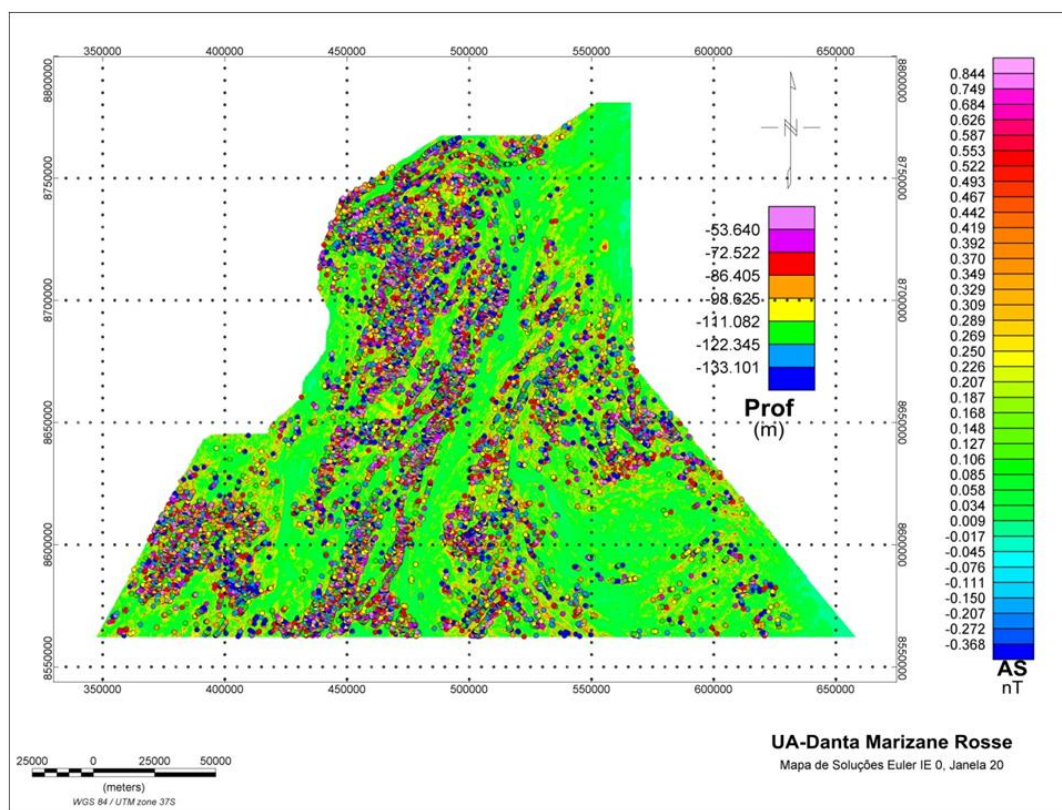


Figura 6.11 - Mapa de soluções da Deconvolução de *Euler* para o índice estrutural 0.

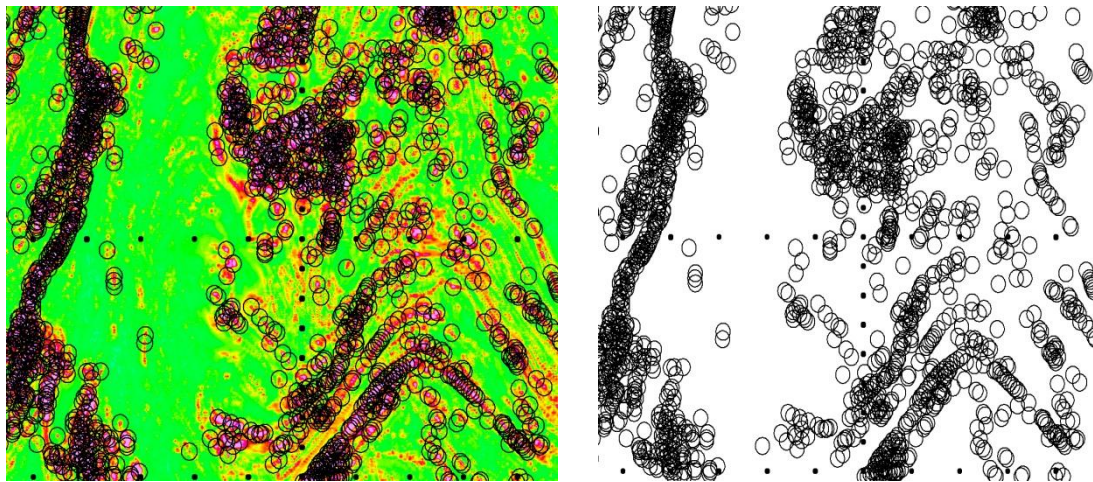


Figura 6.12 - Uma parte do mapa de sinal analítico da área de estudo com soluções Euler índice estrutural 0, ilustrando claramente os limites dos corpos com anomalias positivas; de salientar que para a geração do mapa do sinal analítico foi usado o *cut off* de 0,844 nT.

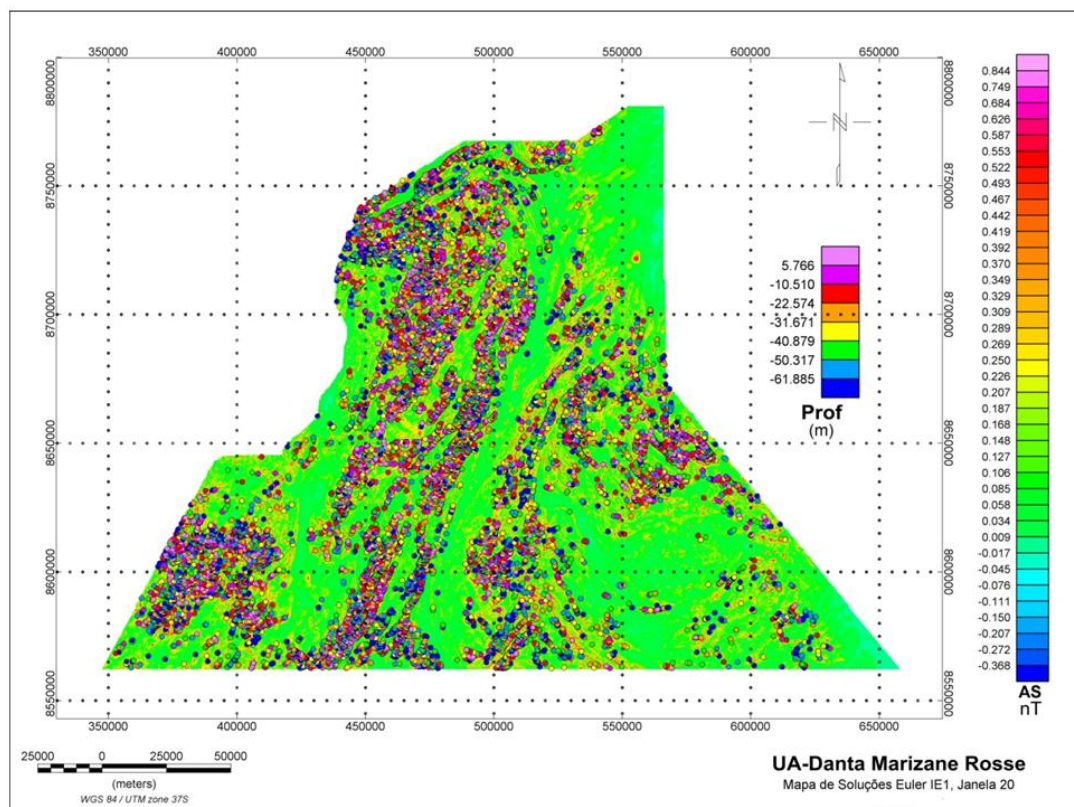


Figura 6.13 - Mapa de soluções da Deconvolução de Euler para o índice estrutural 1.

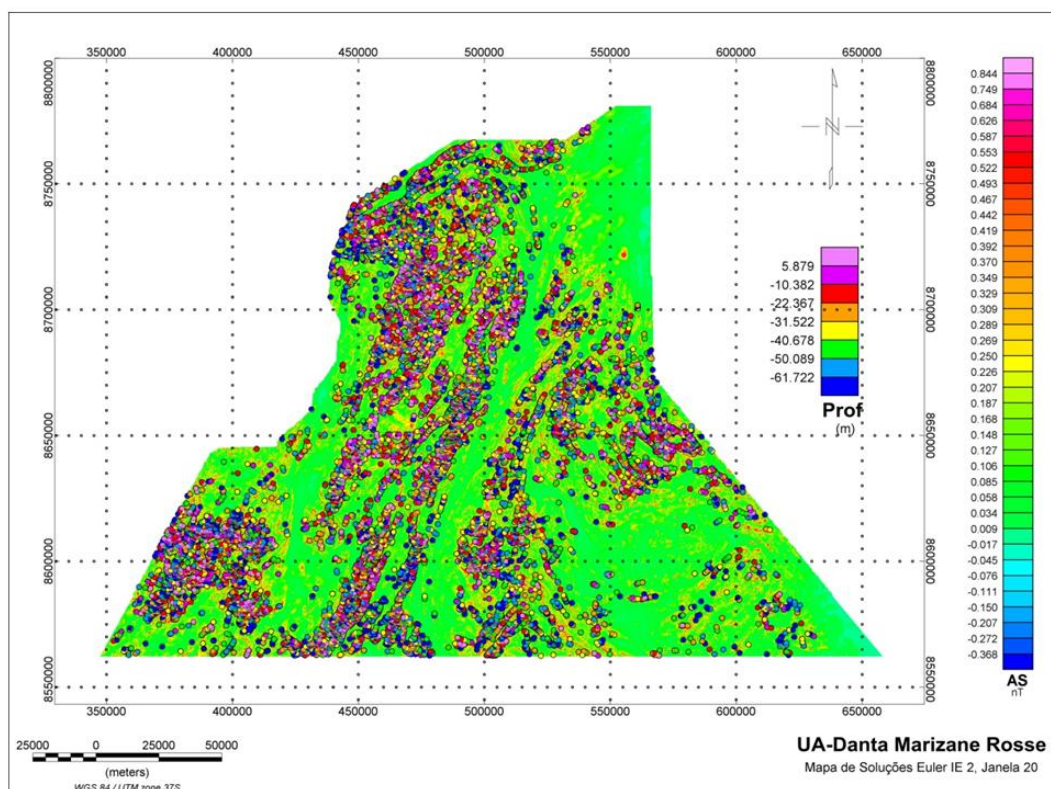


Figura 6.14 - Mapa de soluções da Deconvolução de Euler para o índice estrutural 2.

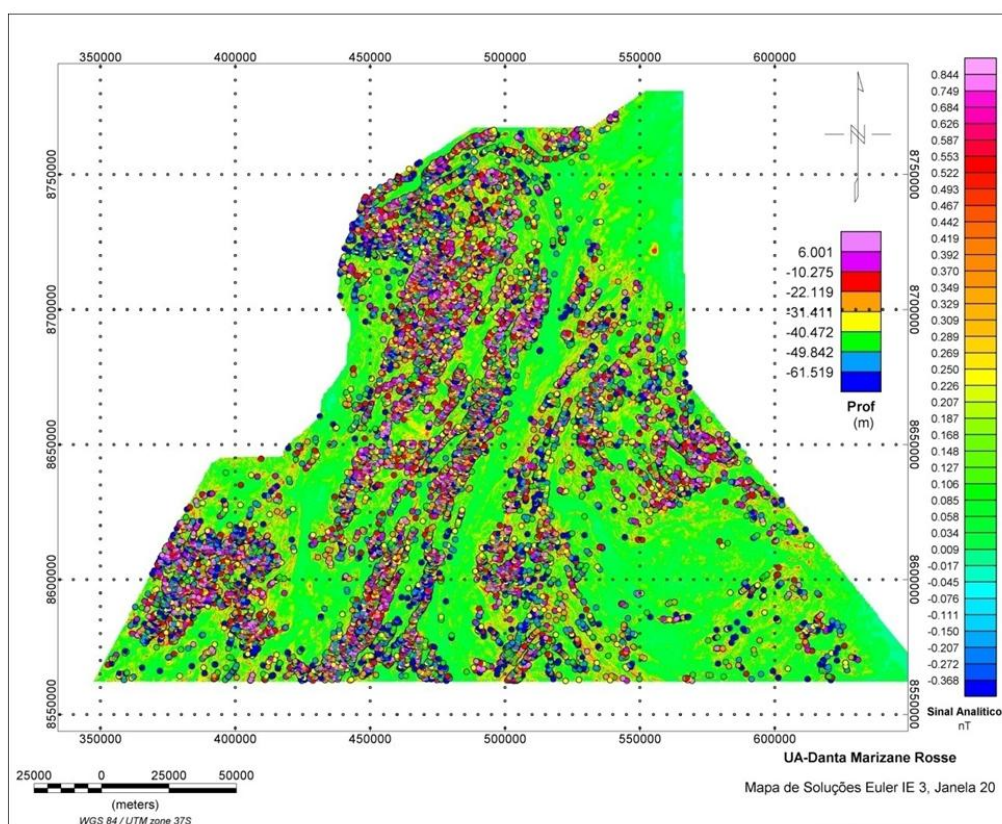


Figura 6.15 - Mapa de soluções da Deconvolução de Euler para o índice estrutural 3.

Baseando-se nos mapas das soluções *Euler* da área em estudo produzidos do processamento de dados no programa da Geosoft, Oasis montaj na versão Educacional (Figuras 6.11, 6.13, 6.14 e 6.15), pode-se concluir que as soluções de índice 0 e 1 é que deram bons resultados quando comparados as soluções dos índices 2 e 3. Isto significa que a área em estudo é rica em contactos e diques e muito pobre em estruturas de índice 2 e 3 que são estruturas com os formatos cilíndrico horizontal ou vertical e esférico ou dipolo. Analisando os mesmos mapas de soluções *Euler* acima referenciados, nota-se que quanto maior for o índice estrutural maior é a profundidade estimada; confirmando-se aquilo que (Reid *et al.*, 1990), obtiveram nas suas investigações.

6.2.7 - Modelação de dados magnéticos

Na figura 6.16 foram desenhados dois perfis orientados na direcção este-oeste numa área em que nota-se uma diversidade qualitativa de assinaturas magnéticas. Cada perfil apresenta duas curvas: uma traçada à linha contínua e de cor preta (curva calculada) e outra linha tracejada de cor verde (curva de campo), cada curva apresenta uma linha média de erros; de cor cinzenta e verde respectivamente (Fig. 6.17); a unidade de leitura é do campo magnético é nT/m.

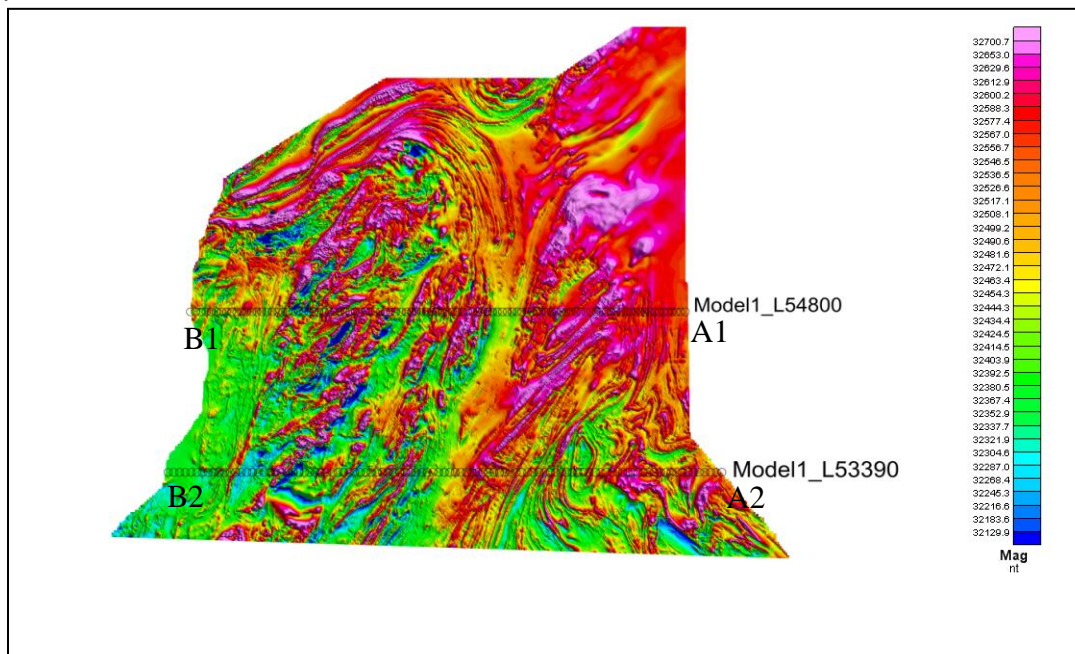
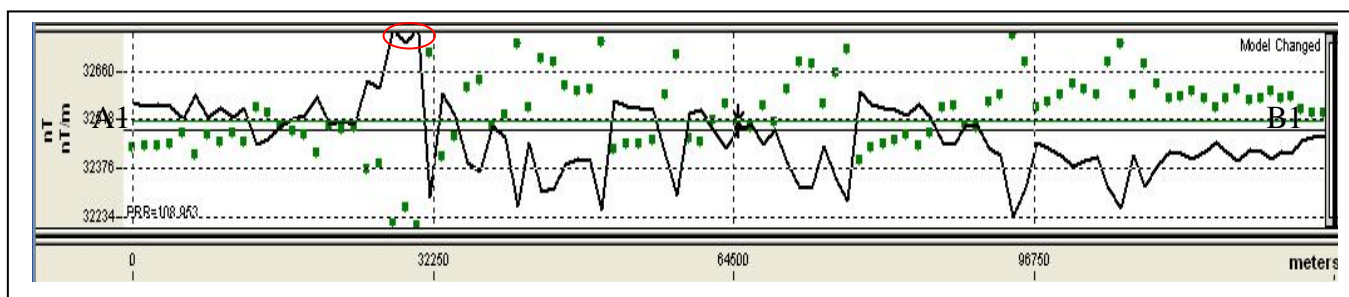


Figura 6.16 – Campo magnético anómalo da área de estudo com dois perfis orientados na direcção E-W (A1-B1 e A2-B2). Os círculos desenhados por linhas vermelhas na curva calculada indicam picos máximos aproximados em cada perfil.

Perfil 1



Perfil 2

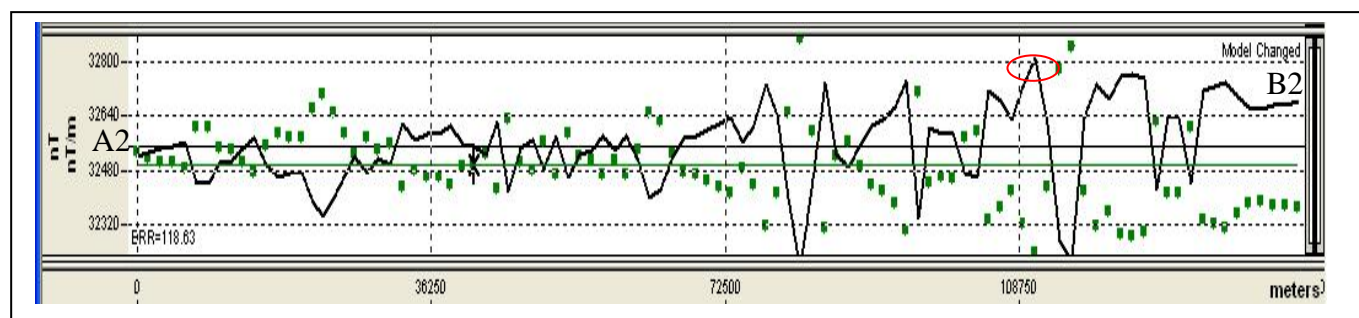


Figura 6.17- Perfis 1 e 2 da área em estudo.

Os perfis 1 e 2 apresentados na figura 6.17, A1-B1 e A2-B2, estão orientados na direcção E-W e correspondem as linhas voo apresentadas na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Interpretação absoluta dos perfis (1 e 2).

Perfil	pico máximo alcançado (nT/m)
Perfil 1 – L54800	acima de 32660
Perfil 2 – L53390	32800

Na figura 6.18 foram desenhados quatro perfis orientados na direcção norte-sul esta área é caracterizada por anomalias negativas. Cada perfil apresenta duas curvas uma traçada à linha contínua e de cor preta (curva calculada) e outra linha tracejada de cor verde (curva de campo), cada curva apresenta uma linha média de erros; de cor cinzenta e verde respectivamente (Fig.6.19); a unidade de leitura do campo magnético é nT/m.

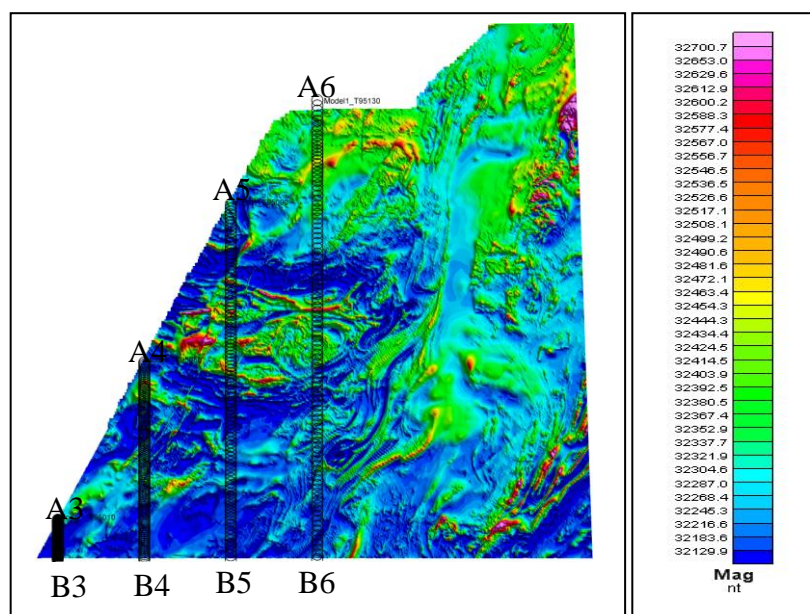
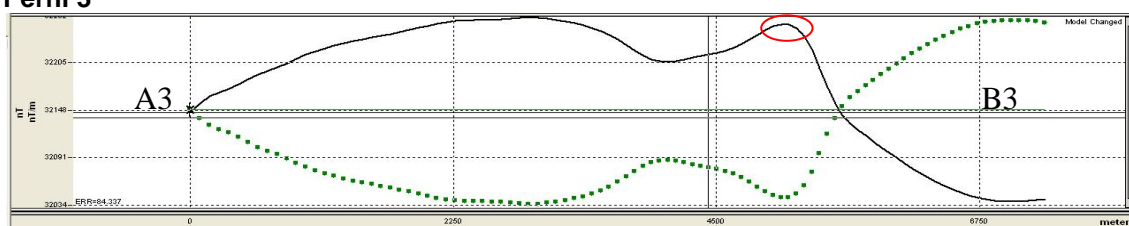
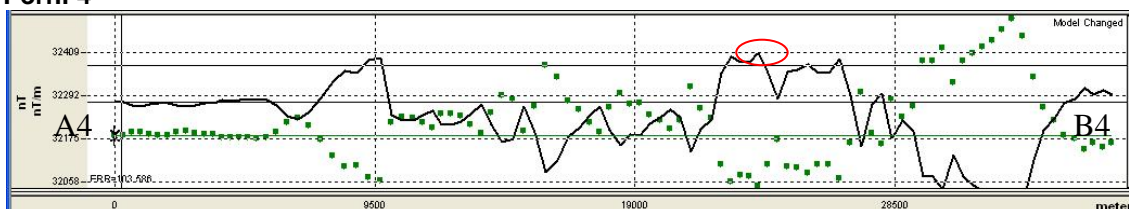


Figura 6.18 – Campo magnético anômalo da área de estudo com quatro perfis (A3-B3, A4-B4, A5-B5 e A6-B6) orientados na direcção norte sul. Os círculos desenhados por linhas vermelhas na curva calculada indicam picos máximos aproximados em cada perfil.

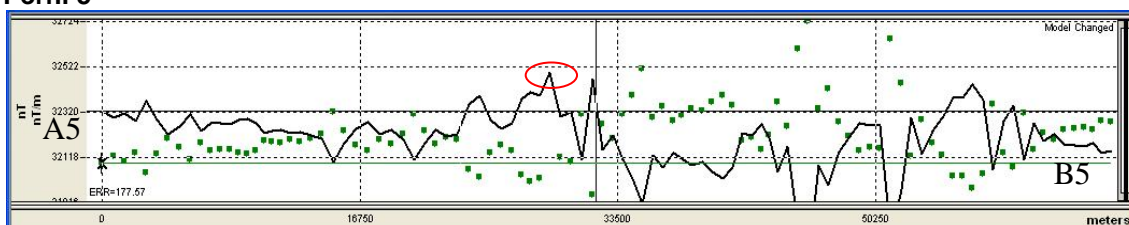
Perfil 3



Perfil 4



Perfil 5



Perfil 6

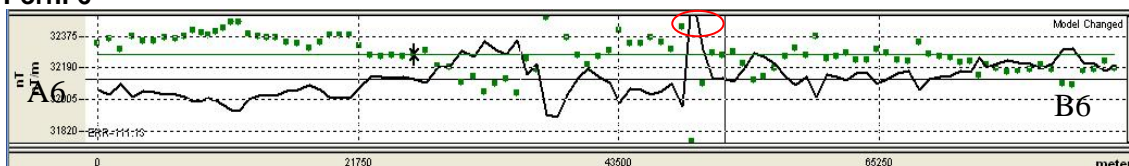


Figura 6.19- Perfis 3, 4, 5 e 6 da área em estudo

Os perfis 3, 4, 5 e 6 apresentados na figura 6.19, A3-B3, A4-B4, A5-B5 e A6-B6 respectivamente, estão orientados na direcção N-S e correspondem às linhas voo apresentadas na Tabela 6.4.

Tabela 6.4- Interpretação absoluta dos perfis 3, 4, 5 e 6

Perfil	Pico máximo alcançado (nT/m)
Perfil 3 – T95010	acima de 32205
Perfil 4 – T95050	32409
Perfil 5 – T95090	acima de 32320
Perfil 6 – T95130	acima de 32375

Na figura 6.20 foram desenhados quatro perfis orientados na direcção norte-sul esta área é caracterizada por anomalias negativas. Cada perfil apresenta duas curvas uma traçada à linha contínua e de cor preta (curva calculada) e outra linha tracejada de cor verde (curva de campo), cada curva apresenta uma linha média de erros; de cor cinzenta e verde respectivamente (Fig.6.21); a unidade de leitura do campo magnético é nT/m.

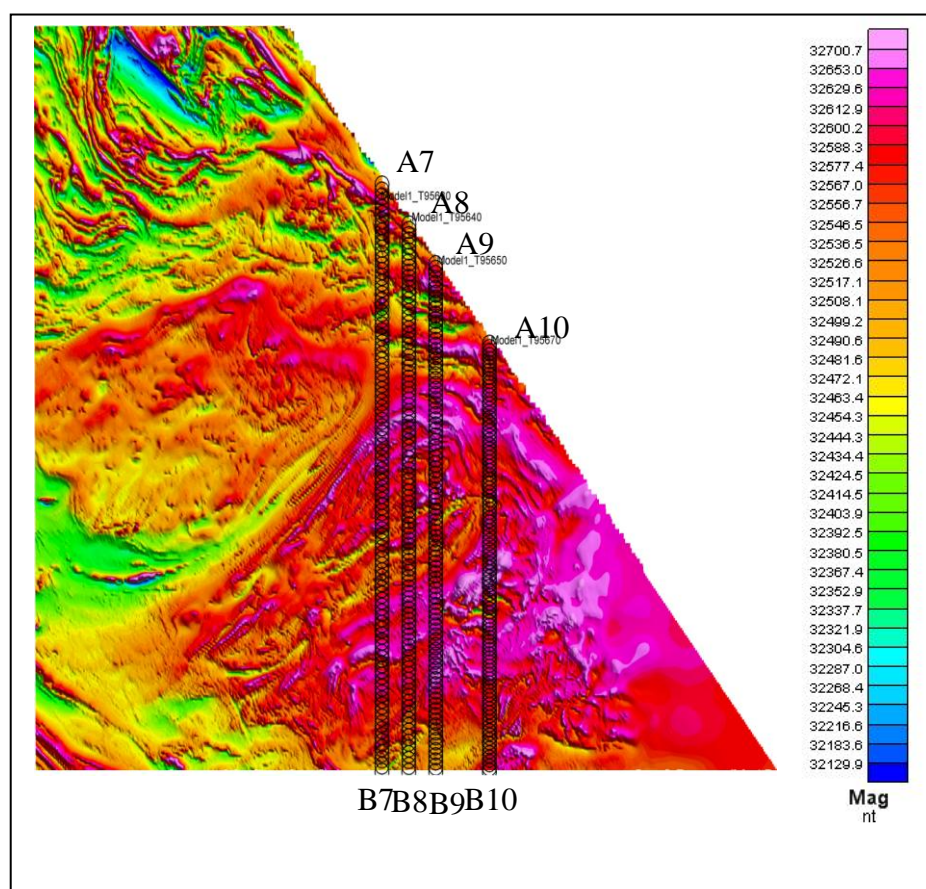
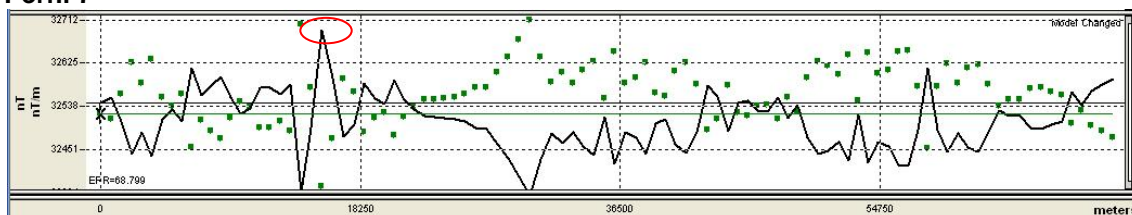
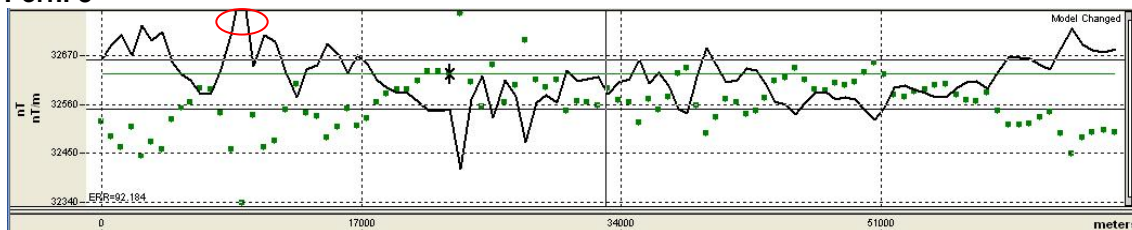


Figura 6.20 – Campo magnético anômalo da área de estudo com quatro perfis (A7-B7, A8-B8, A9-B9 e A10-B10) orientados na direcção norte sul. Os círculos desenhados por linhas vermelhas na curva calculada indicam picos máximos aproximados em cada perfil

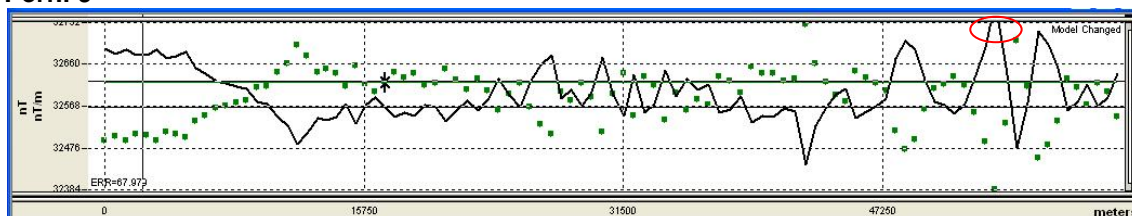
Perfil 7



Perfil 8



Perfil 9



Perfil 10



Figura 6.21 - Perfis 7, 8, 9 e 10 da área em estudo.

Os perfis 7, 8, 9 e 10 apresentados na figura 6.21, A7-B7, A8-B8, A9-B9 e A10-B10, respectivamente, estão orientados na direcção N-S e correspondem as linhas voo apresentadas na tabela 6.5

Tabela 6.5- Interpretação absoluta dos perfis 7, 8, 9 e 10.

Perfil	Pico máximo alcançado (nT/m)
Perfil 7 – T95010	acima de 32625
Perfil 8 – T95050	Acima de 32670
Perfil 9 – T95090	Acima de 32660
Perfil 10 – T95130	Acima de 32780

O método em causa mostrou ser eficaz e ideal para este tipo de aplicação pós os valores absolutos dos picos das anomalias magnéticas alcançados em cada perfil, caem em zonas com anomalias magnéticas positivas e consequentemente tornar possível a cartografia dos prováveis corpos anómalos associados a anomalias magnéticas (positivas ou negativas), dependendo de cada situação.

Qualitativamente, o canto inferior esquerdo (Fig.6.18) da área de estudo apresenta fraco domínio magnético em relação ao seu opositor canto inferior direito (Fig. 6.20). Quando se faz uma relação comparativa dos valores magnéticos qualitativos e os picos máximos alcançados nos perfis A3-B3, A4-B4, A5-B5, A6-B6 canto esquerdo da área de estudo e os dos perfis A7-B7, A8-B8, A9-B9, A10-B10 do canto direito, nota-se que de facto o canto inferior esquerdo apresenta anomalias negativas e o canto inferior direito apresenta anomalias positivas.

Os anexos 2, 3 e 4 deste trabalho apresentam os procedimentos para a utilização da Deconvolução *Euler* nas suas três opções 1, 2 e 3 respectivamente.

Capítulo 7- Prospeccção radiométrica

7.1- Introdução

Potássio, urânio e tório são os únicos radioelementos de ocorrência natural com radioisótopos que produzem raios gama com energia e intensidade suficientes para serem medidos em levantamentos radiométricos (Minty, 1997). A média crustal destes radioelementos é 2% para o K, 2,7 ppm para o U e 8,5 ppm para o Th.

A radiometria aerotransportada mede a abundância relativa ou concentração de K, U e Th em rochas e materiais intemperizados, através da detecção da radiação gama emitida pelo decaimento radioactivo natural destes elementos (Wilford *et al.*, 1997). A radiometria aerotransportada é uma técnica aerogeofísica que requer considerações de muitas variáveis, como por exemplo: contraste das propriedades físicas e geométricas das fontes radioactivas; tamanho e resolução dos detectores; efeitos do meio ambiente (humidade do solo, vegetação e regime de chuvas); movimento das fontes aéreas de radiação na baixa atmosfera, de entre outras. A interpretação de dados radiométricos requer uma compreensão de princípios físicos básicos e um controle eficiente na aquisição dos dados, nos sistemas de calibração, no processamento e nos procedimentos de apresentação dos resultados. É preciso considerar as condições de desequilíbrio radioactivo que ocorrem nas séries de decaimento do urânio, assim como os comportamentos geoquímicos do potássio, urânio e do tório no meio ambiente.

Uma campanha radiométrica aerotransportada avalia a radiação emitida espontaneamente pelo decaimento nuclear dos radioisótopos de ocorrência natural. Esse método contribui de duas formas para o programa de prospecção: primeiro é um método muito directo de prospecção para as mineralizações de urânio, segundo por que os radioisótopos ocorrem numa grande variedade de concentrações e em proporções relativas que reflectem a litologia; por isso, uma campanha radiométrica aerotransportada torna-se bastante importante no auxílio de um programa de cartografia geológica.

7.2- Radioactividade básica

As radiações de substâncias radioactivas naturais são classificadas em três tipos diferentes, dependendo de suas energias penetrativas. Segundo (Arya, 1966), o primeiro tipo, as partículas alfa (α), é caracterizado por uma energia muito pouco penetrativa, sendo barrada por uma fina lâmina de papel, causando ionização no ar. O segundo tipo, as partículas beta (β), apresenta maior energia penetrativa e ioniza o ar por alguns centímetros, podendo facilmente atravessar uma lâmina metálica com poucos milímetros de espessura. O terceiro tipo, os raios gamas (γ), pode ionizar o ar até 300 metros (Grasty, 1975), por isso é registado em levantamentos radiométricos aéreos, além de atravessar lâminas de muitos centímetros de espessura, de diferentes materiais (Minty, 1997), demonstrou que partículas α mostravam um pequeno desvio, quando influenciadas por um forte campo magnético e comportavam-se como cargas positivas. As partículas β , mostraram desvios maiores e comportavam-se como partículas negativas. Enquanto que os raios gamas (γ), como foi demonstrado por (Arya, 1966), não se desviavam sob a acção de campos magnéticos semelhantes. Dos três diferentes tipos de radiação, apenas será descrito nesta dissertação o terceiro tipo, radiação gama dada a sua importância nos levantamentos da geofísica aérea.

7.3- Raios gama

Os raios gama produzem fluorescência e causam ionização em ambiente gasoso, mas em menor grau do que os raios alfa e beta. A energia penetrativa dos raios gama é 100 vezes superior à dos raios beta. Podem penetrar em mais de 30 cm de rocha e várias dezenas de metros no ar (Minty, 1997).

Os raios gama não são obstruídos por alguns centímetros de alumínio, mas pouco centímetros de chumbo podem reter uma boa fracção destes raios. Como não apresentam carga, não são desviados por campos eléctricos ou magnéticos, e exibem todas as características de uma onda electromagnética.

Na realidade, raios gama são raios-X de curto comprimento de onda. Possuem a velocidade da luz e exibem comprimentos de onda de $1,7 \times 10^{-10}$ a $4,1 \times 10^{-8}$ cm, sendo caracterizado por uma faixa de frequência entre 3×10^{19} e 3×10^{21} Hz. As energias de interesse geológico variam entre 0,2 e 3 Mev, as

quais correspondem a comprimentos de onda de aproximadamente 3×10^{-12} m e uma frequência de cerca de 3×10^{19} Hz (Minty, 1997).

A radiação gama (γ) detectada na superfície terrestre é resultante da desintegração de elementos radioactivos. A desintegração é decorrente da instabilidade do núcleo do átomo radioactivo que liberta energia pela emissão de partículas alfa (α), beta (β) e radiação gama (γ). As principais fontes de radiação gama provêm da desintegração natural do potássio (K_{40}), urânio (U_{238}) e tório (Th_{232}) que estão presentes na composição da maior parte das rochas na superfície. Entretanto somente podem ser detectadas até aproximadamente 30 cm de profundidade.

A contagem total de radiação é obtida pela medida de todos os raios gama dentro da janela energética de 0,41-2,81 Mev, estabelecida para a contagem total. Cada elemento possui uma janela onde as suas energias estão centradas (figura 7.1): o potássio monitora os raios gama com valor de energia de 1,46 Mev pelo K_{40} . Os isótopos U_{238} e Th_{232} não emitem radiação gama, porém seus isótopos decorrentes do decaimento radioactivo (Bi_{214} e Tl_{208}) emitem raios gama com energias centradas em 1,76 e 2,61 Mev, respectivamente (Blum, 1999).

Na prática, a série U_{235} não se considera para efeitos de prospecção radiométrica pois a sua concentração relativamente a série do U_{238} é da ordem de 0,7% e a sua contribuição para a radiação total gama poderá considerar-se insignificante para efeitos práticos.

Os raios gama são unicamente emitidos em energias discretas características da desintegração e é sobre estes raios gama que incidem as medidas do espectrómetro da Aeronave. Por observação dos picos do espectro de energia poder-se-ão inferir as características dos elementos radioactivos do meio.

É de salientar que a discussão pormenorizada dos processos de decaimento radioactivo, não fazem parte dos objectivos desta dissertação no entanto o leitor poderá encontrar mais informação adicional em (Minty, 1997) em particular o conceito de equilíbrio radioactivo é um pressuposto básico e

importante da espectrometria de raios gama que é claramente explicado por (Kileen, 1979).

7.4- Espectrometria de raios gama

O decaimento do Bi_{214} , produz picos de energia de 0,77; 1,12; 1,38; 1,76; e 2,20 Mev. O decaimento dos isótopos da série de tório produz de igual forma um pico principal de energia a 2,62 Mev e picos secundários a 1,61 e 2,11 Mev. Enquanto o decaimento do K_{40} produz um pico isolado a 1,46 Mev. O efeito de difusão de *Compton*, conduz a perda de energia dos fotões gama de forma que os fotões secundários de menor energia provenientes deste efeito levam a uma maior contagem de impulsos na zona do espectro correspondente à baixa energia.

É evidente que no espectro da (Fig.7.1) há sobreposição de picos numa certa extensão, mas note que os picos principais estão bem separados. Neste caso o espectrómetro foi regulado de forma a registar os raios gama em quatro bandas ou “janelas espectrais” que se encontram esquematizadas na figura 7.1. No canal 1 registava-se o número de impulsos fotais para um intervalo de 0,4 a 3,0 Mev, no canal 2 para o intervalo de 1,36 a 1,56 Mev, no canal 3 intervalo entre 1,66 e 1,86 Mev e no canal 4 entre 2,42 e 2,82 Mev.

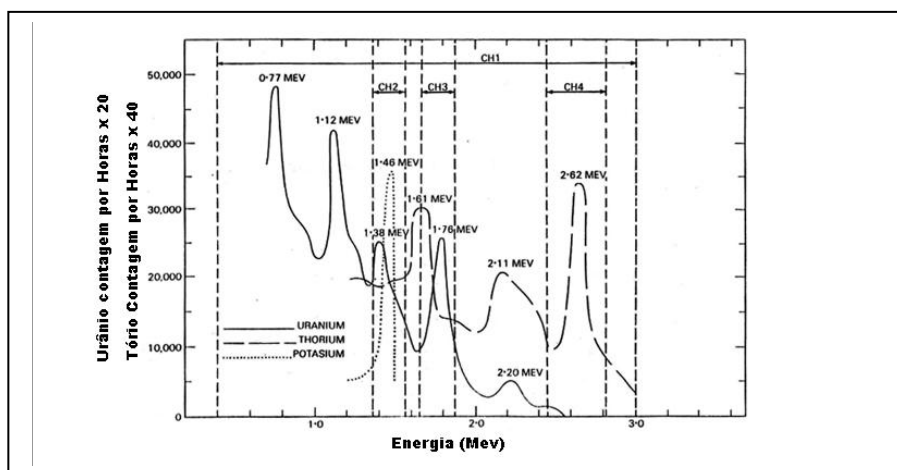


Figura 7.1 - Espectros de radiação gama mostrando as posições da janela de energia para cada elemento (adaptada I.A.E.A., 2003).

7.5- Correção dos resultados

Na figura 7.1 pode-se observar que o canal 2 registava fotões gama provenientes da desintegração de vários isótopos incluindo o K_{40} . Para obter uma

taxa de impulsos que só reflecta a concentração de potássio no meio será necessário aplicar aos dados em bruto, registados pelo espectrómetro, uma série de correcções.

Da mesma forma aplicar-se-ão correcções ao canal 3 e 4 no sentido de obter as concentrações respectivas de urânio e tório. Geralmente as correcções aplicadas são:

- Remoção do fundo regional não geológico provocado pela radiação cósmica e pelo gás *radon* disperso na atmosfera.
- Correcção de altitude.
- Interação entre canais, geralmente denomina-se “*Stripping*”.

Os coeficientes de difusão de *Compton* ou “*stripping*”, estabelecem-se no campo empiricamente fazendo o uso de fontes calibradas de urânio e tório localizadas numa posição fixa em relação aos cristais detectores. Quando os quatro coeficientes: a, b, c e d estão determinados, estes poderão ser utilizados de modo a encontrar K_2 , U_3 e Th_4 a partir das equações (7.1), (7.2) e (7.3):

$$C_4 = Th_4 + (d \times U_3) \quad (7.1)$$

$$C_3 = U_3 + (a \times Th_4) \quad (7.2)$$

$$C_2 = K_2 + (b \times U_3) + (c \times Th_4) \quad (7.3)$$

As taxas de impulsos corrigidos ao fundo de referência aos canais 2, 3 e 4 são respectivamente C_2 , C_3 e C_4 , representando potássio no segundo canal (K_2), do urânio no terceiro canal (U_3) e de tório no quarto canal (Th_4). Se necessários poderão então utilizar-se as constantes de sensibilidade do método de forma a corrigir as taxas de impulsos dos canais 2, 3 e 4 para concentrações no terreno de potássio, urânio e tório respectivamente.

7.6- Factores que influenciam a radiação gama

As emissões de radiação gama são influenciadas por diversos factores, sendo a sua medição prejudicada pela humidade, cobertura vegetal e intemperismo, que afectam as medidas não por mobilização química e física. O relevo também pode

influenciar as aferições devido à mistura dos materiais confundindo a interpretação. A seguir estão descritos os factores mais significativos.

7.6.1- Recobrimento¹¹

A maior parte da radiação gama originária do terreno provém dos primeiros 30 cm da sua superfície, pelo que não serão detectáveis anomalias se o material radioactivo se apresentar abaixo desta profundidade. Todavia frequentemente o recobrimento advém directamente das rochas subjacentes, assim a sua composição deve reflectir a composição do *bedrock*. É este facto que torna uma campanha radiométrica aerotransportada numa importante ajuda aos programas de cartografia geológica. Diz-se que uma rocha radiométrica tem um *halo* de dispersão secundária quando o seu recobrimento deriva directamente ou é permeável ao *radon*. Efectivamente *halos* são muito úteis, pois aumentam o tamanho dos alvos de um depósito mineral, podem no entanto serem enganadores por que a expressão radioactiva da superfície pode ser muito mais extensa do que a da fonte.

7.6.2- Transporte do recobrimento

Outro factor que se deve ter em consideração durante a interpretação radiométrica é a possibilidade do recobrimento poder ser transportado na forma de depósitos aluvionares.

7.6.3- Altura do voo

A radiação gama de superfície pode detectar-se até uma altura de 300 m, mas a 50 e 200 m dá-se respectivamente uma redução da intensidade original de 25% e 75% respectivamente. Muitas vezes, no sentido de estabelecer uma ligação entre os perfis transversais a Aeronave tem que manter sempre que possível um afastamento constante relativamente ao terreno. No entanto é necessário recordar que no fim os resultados deverão ser corrigidos quanto à variação nominal de afastamento ao terreno a partir do registo altimétrico da Aeronave.

Por vezes devido a razões de segurança a Aeronave tem que aumentar a altitude de voo de modo a sobrevoar cordilheiras, e elevações topográficas quando a área de campanha contém enuméras montanhas, escarpas isoladas

¹¹ Do original *overburden*.

e *inselbergs* que se levantam bruscamente. Ao sobrevoar algumas destas elevações, a Aeronave é obrigada a exceder o afastamento nominal de 120 m em relação ao terreno. As razões da sobre-elevação da Aeronave compreender-se-ão melhor analisando a (Fig.7.2), produz-se um conjunto separado de diagramas que indica as áreas onde a altitude do voo excedeu os 120 m. Estes diagramas sempre deverão ser usados desde que se pretenda uma interpretação radiométrica de forma a identificar as áreas onde os resultados terão de ser analisados cautelosamente.

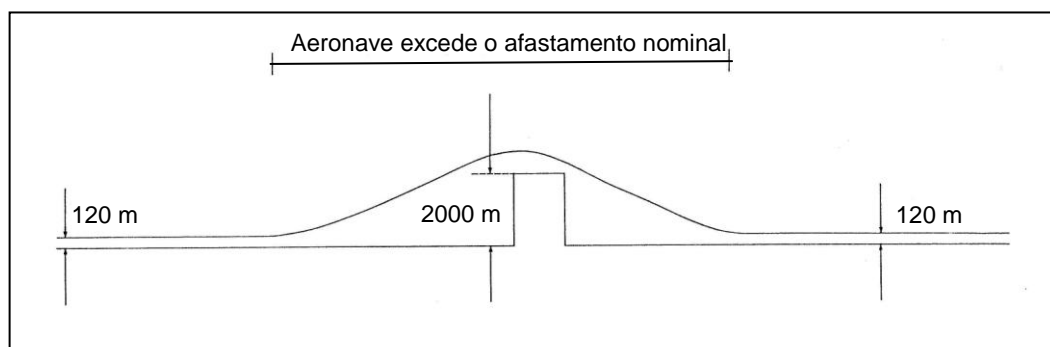


Figura 7.2 - Altitude de Aeronave em cima de montanha íngreme *Hunting Geology and Geophysics Limited Report*, 1983.

O relevo topográfico afecta as áreas superficiais de que depende a resposta radiométrica do espectrómetro, produzindo-se assim o conhecido efeito de ângulo sólido sobre o qual não poderá ser aplicada nenhuma correcção automática. Esta é outra razão pela qual os resultados radiométricos nas vizinhanças de montes ilha deverão ser cuidadosamente interpretados.

7.7- Comportamento geoquímico dos radioelementos na natureza

7.7.1- Urânio

Segundo (Dickson & Scott, 1997), na crosta terrestre o U apresenta aproximadamente 2,7 ppm de abundância média. Sua química é dominada por dois estados de valência U^{4+} e U^{6+} . A forma mais reduzida, o U^{4+} , geralmente está contida em minerais insolúveis. Contrariamente, a forma oxidada, o U^{6+} , complexa-se com aniões como os carbonatos, sulfatos e fosfatos para formar algumas espécies solúveis. A mobilidade do U^{6+} é modificada pela adsorção a óxidos hidratados de ferro, minerais de argila e coloides, como também pela redução a minerais de U^{4+} quando encontra-se em ambientes redutores. A sua

presença nas rochas está associada aos óxidos e silicatos; principalmente em minerais como monazite e zircão; em quantidades traço em outros minerais formadores de rochas; ou ainda ao longo dos limites dos grãos, principalmente como óxidos ou silicatos de urânio. Dos principais minerais que contém o urânio, somente a monazite e o zircão são estáveis durante o intemperismo. O urânio libertado dos minerais, pode ser retido em óxidos de ferro e minerais de argila ou precipitado em condições redutoras, formando-se os depósitos de urânio em circunstâncias favoráveis.

7.7.2- Tório

A concentração média do Th na crosta é aproximadamente de 8,5 ppm, constituindo-se o segundo elemento da série dos actinídeos. Apesar de apresentar dois estados de oxidação, Th^{3+} e Th^{4+} , geoquimicamente, este último estado de valência é de grande importância, uma vez que o primeiro é raro na natureza e instável em ambiente aquoso (Boyle, 1982). A solubilidade de complexos de Th é geralmente baixa, excepto em soluções ácidas, de acordo com (Dickson & Scott, 1997). Entretanto, compostos orgânicos, como os ácidos húmicos, podem aumentar a solubilidade do Th em condições de pH neutro (Dickson & Scott, 1997).

Devido a semelhança química do Th com elementos como o Zr, Hf e certos elementos terras raras, especialmente o Ce (Boyle, 1982), os minerais formados por estes elementos, podem conter Th através de substituições iónicas. Assim, são frequentes as seguintes trocas: de Zr por Th, em minerais de zircão, Y, Ce e outros lantanídeos por Th na maioria de minerais de terras raras; U por Th em certos minerais de urânio como resultado da similaridade dos raios iónicos. A mobilidade do Th na forma de complexos e de colóides também pode ocorrer em complexos solúveis de sulfatos, nitratos, carbonatos, fosfatos, silicatos, orgânicos e outros. Os principais minerais que contém Th (Monazite e Zircão) são estáveis durante o intemperismo e podem acumular-se em depósitos de minerais pesados. O Th libertado durante o intemperismo, pode ser retido em óxidos e hidróxidos de Fe ou Ti e em argilas. A semelhança do U, o Th pode também ser transportado quando adsorvido em colóides argilosos e óxidos de ferro.

7.7.3- Potássio

O potássio com uma proporção de 2 % na crosta terrestre é um elemento alcalino. A principal ocorrência de K em rochas é nos feldspatos potássicos (principalmente na ortoclase e na microclina com aproximadamente 13% de K) e nas micas (biotite e muscovite com aproximadamente 8% de K). Segundo (Dickson & Scott, 1997), o K está praticamente ausente em rochas máficas. O K apresenta teor relativamente alto em rochas félsicas (granitos), mais baixo em basaltos e muito baixo em dunitos e peridotitos. O comportamento do K frente ao intemperismo, determina os teores do radioelemento K^{40} nas rochas intemperizadas e nos solos. Durante o intemperismo, a maior parte do K é destruída nos minerais na seguinte ordem: biotite – feldspato potássico – muscovite.

O K libertado durante o intemperismo pode participar na formação de minerais como ilite, ou então ser adsorvido em quantidades em outras argilas, como por exemplo a montmorilonite, sob condições adequadas. A eficiente captura de K pelas argilas é reflectida nas baixas concentrações de K nas águas dos oceanos (380 ppm).

O K é detectado em levantamentos de raios gamas pela medição de 1,46 Mev emitida pelo decaimento do K^{40} . Este isótopo constitui 0,012% do K natural e permite uma medida directa do teor de K no terreno.

7.8 - Processamento dos dados gamaespectrométricos

O processamento dos dados gamaespectrométricos teve grande aplicação na delimitação e diferenciação das unidades geológicas na área de estudo. Quando não é originada pela superfície terrestre, a radiação gama é geralmente encarada como *background* cósmico, que é removido durante a aquisição dos dados. Nas técnicas de tratamento interpretativo dos dados gamamaespectrométricos aéreos estão incluídas as técnicas analíticas qualitativas das imagens individualmente tratadas de K, Th, U e Contagem total; técnicas que utilizam a combinação ternária entre os canais radiométricos utilizando os padrões de cores *RGB* e *CMY* e técnicas de normalização dos elementos de K, Th e U. As técnicas aqui referidas serão descritas a seguir:

7.8.1- Contagem total

O mapa de contagem total compreende a medida de todos os raios gama de interesse geológico abrangendo todo o espectro. K, U e Th são elementos que ocorrem com radioisótopos que produzem raios gama de energia e intensidade suficiente para serem medidas em espectrómetros de raios gama com cada um associado a um determinado “pico” (Minty, 1997). A figura 7.3 representa o mapa de contagem total.

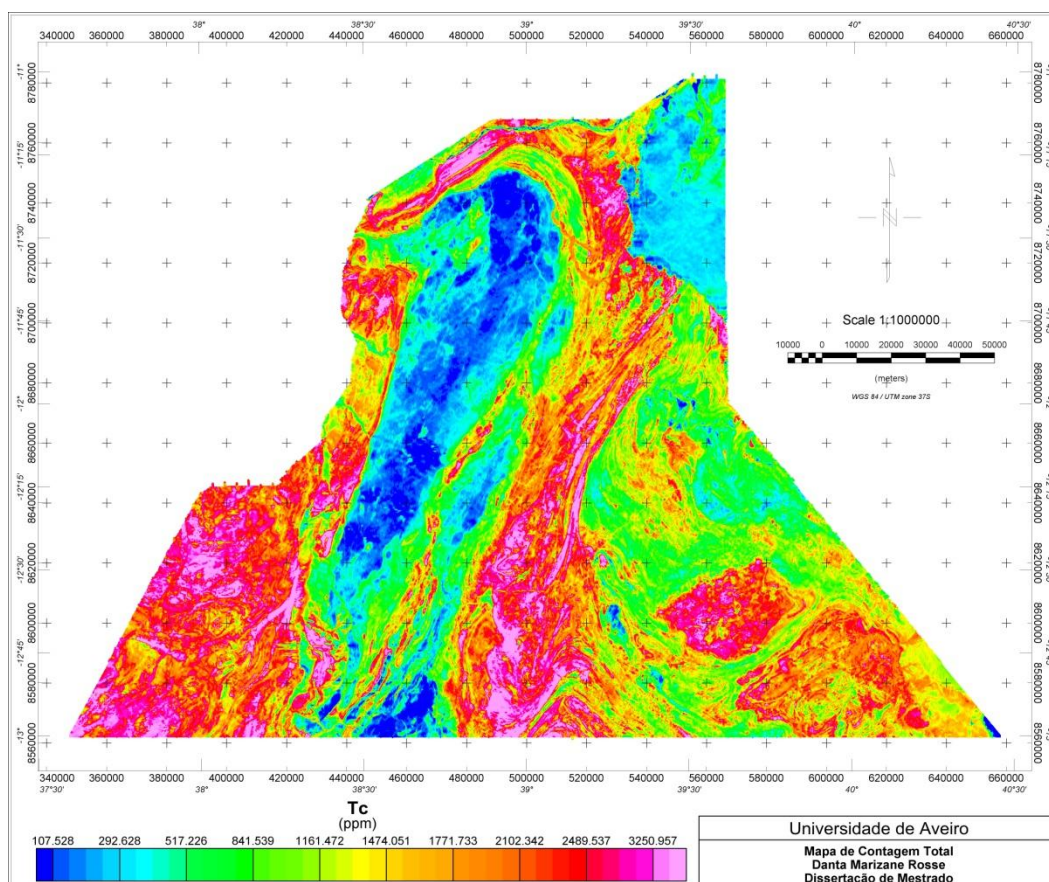


Figura 7.3 - Mapa de contagem total da área em estudo.

7.8.2- Canal do potássio

Dos três elementos radiométricos considerados, o K é o elemento mais abundante na crosta terrestre e ocorre, como já foi referido anteriormente, principalmente em álcali-feldspatos e micas presentes nas rochas félsicas, principalmente granitóides. Pode ser facilmente lixiviado e transportado. O mapa da figura 7.4A representa o sinal do canal de potássio.

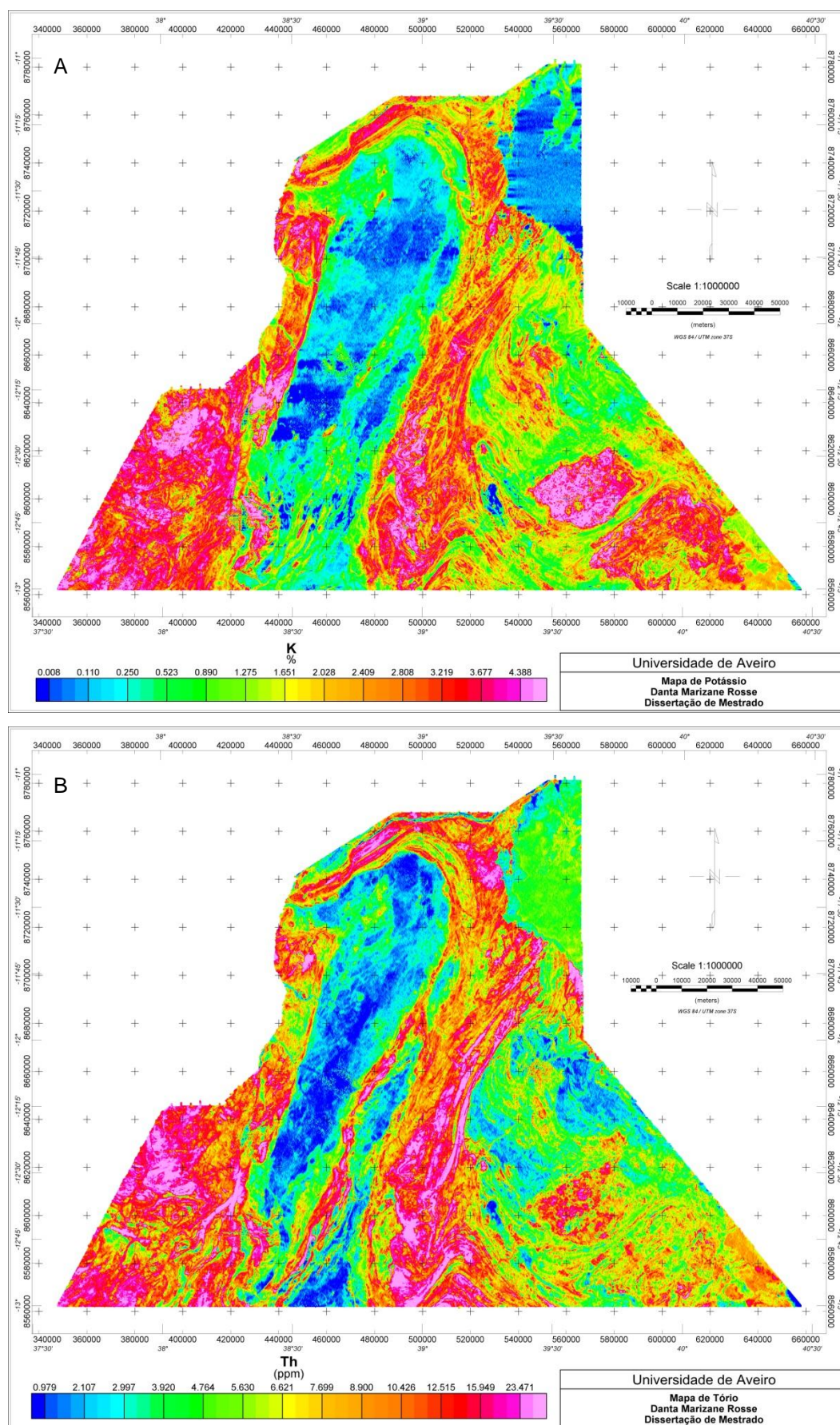


Figura 7.4- Mapa individual do canal de (A) K e (B) Th da área em estudo.

7.8.3 - Canal do tório

O Th é o elemento mais inerte dos três radioelementos. A sua concentração quando superior a dos outros dois radioelementos nomeadamente K e U, significa que esta região, é de maior intemperismo químico. O grande equilíbrio desse elemento faz com que ele seja o melhor marcador litológico (Fig.7.4B).

7.8.4- Canal de urânio

O urânio é o elemento de menor concentração. Assim como o Th, este elemento ocorre em minerais acessórios. Uranite é o mineral de urânio mais comum como constituinte maior e ocorre como inclusões em minerais formadores de rochas ou como grandes grãos em granitos mineralizados e em pegmatitos. Quando ocorre em ambientes oxidantes é solúvel, formando minerais com óxidos de ferro e carbonatos. A figura 7.5 mostra o mapa de urânio.

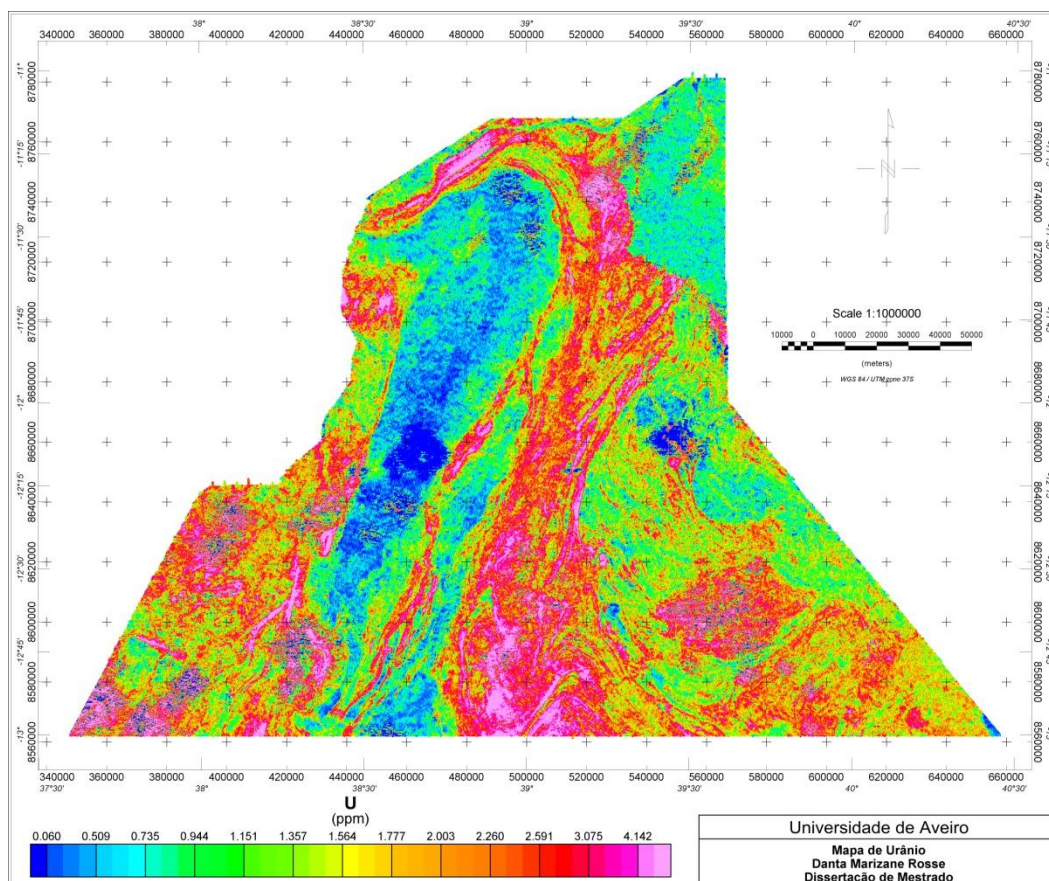


Figura 7.5 – Mapa individual do canal de U da área em estudo.

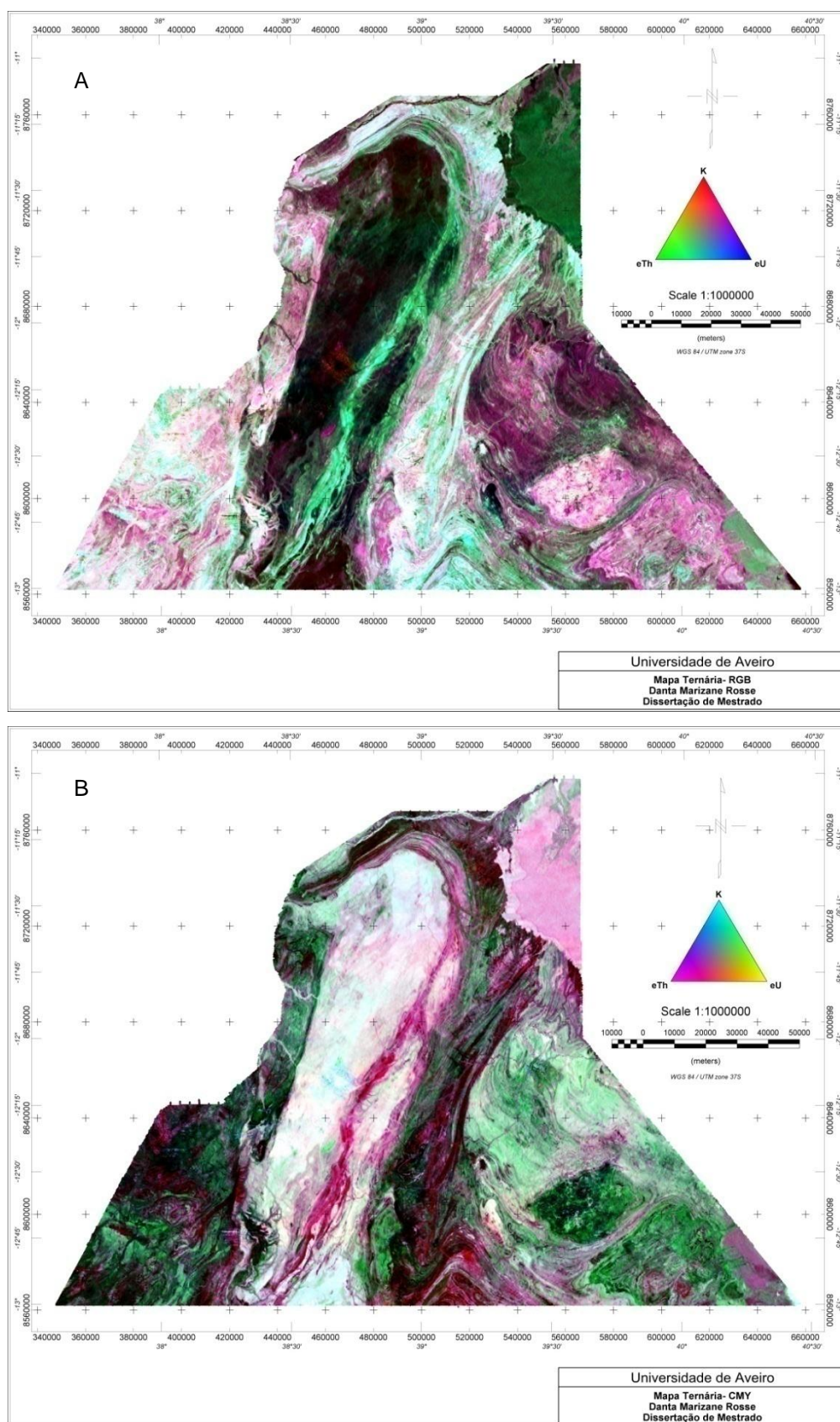


Figura 7.6 – (A) Mapa ternário RGB (K-red, eTh-green e eU-blue) e (B) CMY (K-Cyan, eTh-Magenta e eU-Yellow). da área em estudo produzidos a partir da combinação dos mapas individuais de anomalias do K, Th e U e em que se realça os diferentes domínios gamaespectrométricos.

7.8.5- Composição em falsa cor

A figuras 7.6A e B representam as composições em falsa cor dos canais dos três radioelementos (potássio, tório e urânio).

Para cada radioelemento é atribuído uma cor, nas imagens ternárias *RGB*: a cor vermelha (*R-red*), para as rochas ricas em potássio verde (*G-green*), para as rochas ricas em tório e azul (*B-blue*) para as rochas ricas em urânio (Fig.7.6A), e a ternária *CMY* (*C-cyan*, *M-magenta* e *Y-yellow*), os altos teores de potássio, tório e urânio respectivamente (Fig.7.6B).

Capítulo 8 – Síntese dos resultados do processamento e respectiva interpretação

Das diferentes imagens produzidas durante o processamento, o mosaico elaborado a partir de imagens de satélite do *Google* e dos dados aerogeofísicos (magnéticos e gamaespectrométricos) foram seleccionadas as seguintes imagens: mosaico, primeira derivada do campo magnético anómalo e radiométrica ternária *RGB* para servirem de base para esta interpretação (Fig.8.1). Não significa que as restantes imagens referenciadas no texto não tiveram aplicação, pelo contrário foram sempre consultadas durante a interpretação a fim de certificar algumas ocorrências.

Como era de esperar, cada imagem é adequada a uma determinada aplicação, em função dos objectivos do estudo, mas é sempre conveniente associar as informações colhidas das diferentes imagens de modo a tornar fácil a interpretação.

Observações comparativas feitas a partir das diferentes imagens obtidas durante o processamento, permite-nos constatar que a imagem magnética aplicada ao filtro da derivada vertical da primeira ordem mostra com clareza as estruturas geológicas: estruturas circulares, falhas, lineações, dobras, diques, fracturas. Todavia a imagem radiométrica ternária *RGB*, não revela devidamente as estruturas geológicas mais profundas, mas detalha claramente os domínios litológicos razão pela qual foi a imagem usada neste trabalho para definir os limites entre as unidades geológicas da área de estudo. A imagem de satélite mostra a geologia da superfície mas, como temos a cobertura vegetal

sobre a superfície, não consegue registrar a geologia das regiões cobertas, ela mostra as estruturas geológicas na escala regional (dobras, falhas), zonas de cisalhamento, limites geológicos.

Nesta dissertação as estruturas circulares, os diques as falhas e as dobras foram digitalizadas a partir da imagem do campo magnético anómalo aplicado ao filtro da primeira derivada vertical.

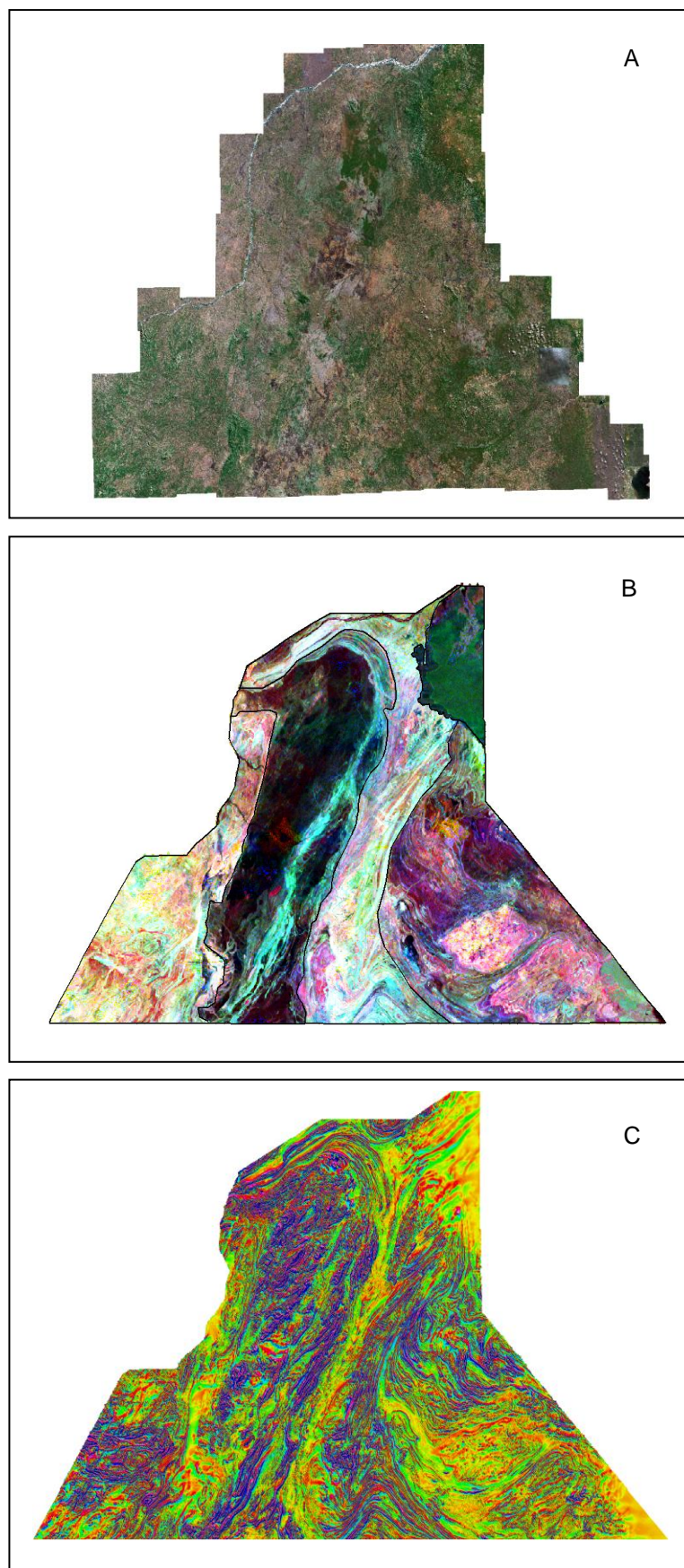


Figura 8.1- As três imagens que serviram de base para o estudo em causa, nomeadamente: (A) Imagem de satélite, (B) Imagem radiométrica ternária *RGB* e (C) primeira derivada do campo magnético anómalo.

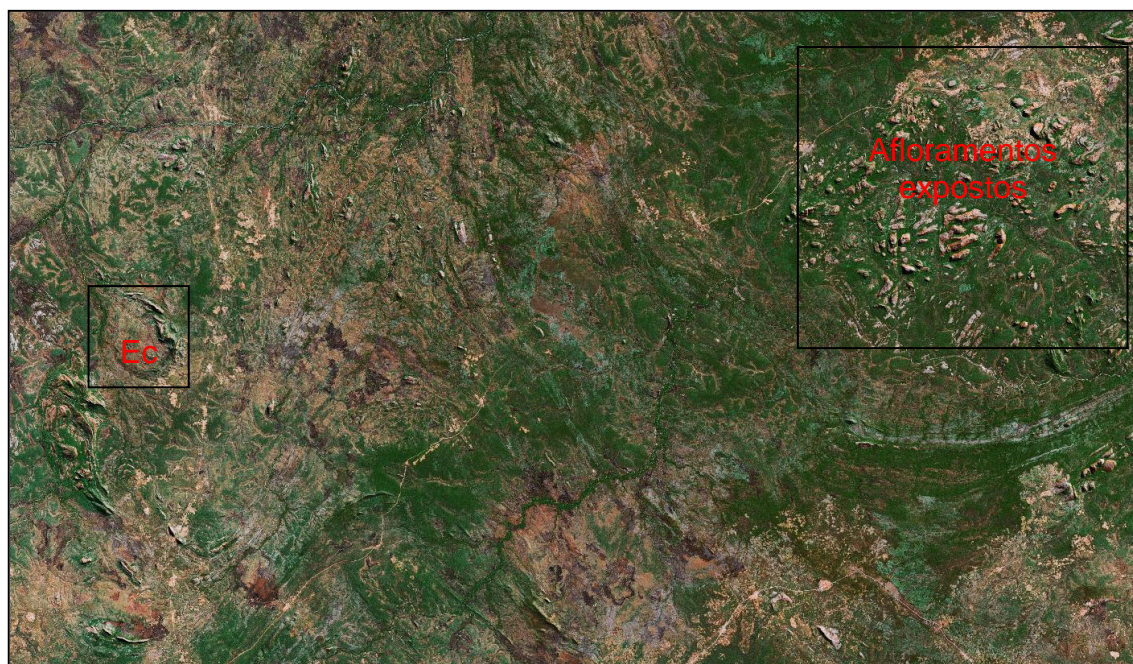


Figura 8.2 - Imagem de satélite (mosaico), ilustrando vias de acesso, estruturas geológicas mais superficiais (estruturas circulares (Ec), dobras e falhas), afloramentos expostos, vegetação e alterações do solo.

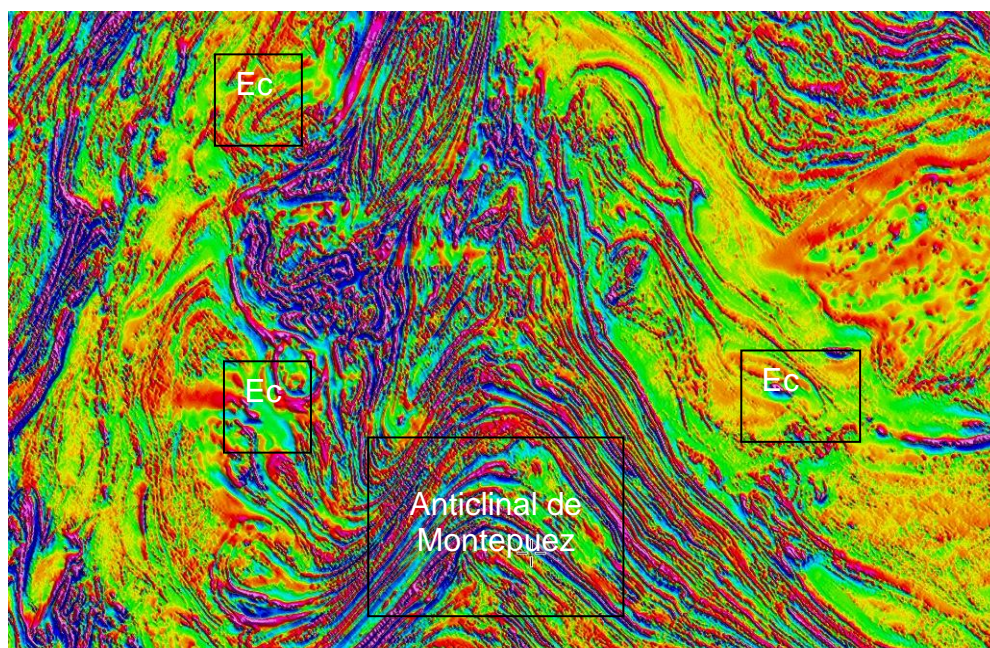


Figura 8.3- Imagem da primeira derivada vertical correspondente a mesma área ilustrada na figura 8.2, mostrando detalhadamente as estruturas circulares (Ec), dobras sobretudo a (anticlinal de Montepuez) definidas a partir de anomalias positivas. Sobre esta imagem pode se digitalizar os eixos dos diferentes eventos de dobramento.

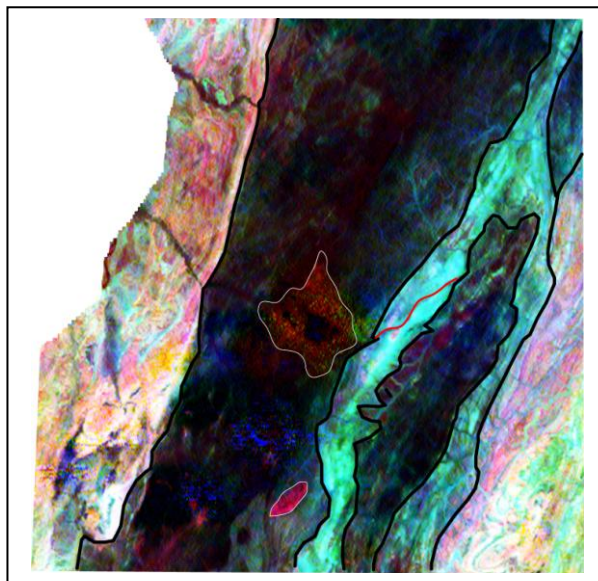


Figura 8.4 - Imagem radiométrica ternária RGB, ilustrando detalhadamente os limites (linhas pretas) entre as diferentes unidades gamaespectrométricas da área de estudo. Nesta imagem pode se notar também alguns corpos intrusivos (polígonos traçados com linhas de cor branca) e a falha (linha de cor vermelha).

8.1- Interpretação geológica-estrutural

Para efectuar a interpretação geológica estrutural, a área de estudo foi dividida em domínios/blocos estruturais com as designações: M, N, X, ML e FR. Estes blocos foram definidos com base na orientação predominante das estruturas, conforme se pode observar das imagens geofísicas (Fig.8.5).

Na área de estudo afloram rochas dos complexos de: Marrupa, Nairoto, Xixano Chivaro, Meluco e as Formações Recentes; respectivamente bloco M, N, X, ML e FR. Na área em estudo predomina as unidades do Complexo de Xixano Chivaro e do Meluco sem subestimar as do Marrupa e do Nairoto. As camadas das formações do Complexo Xixano Chivarro encontram-se genericamente orientadas na direcção NE-SW e as do Meluco nas direcções NW-SE.

Com base na litoestratigrafia da geologia de Moçambique (Tabela 3.1), os Complexos de Marrupa, Niroto e Meluco fazem parte do Conjunto Orogénico

Moçambicano (1.100 a 850 M.a.), concretamente do Supergrupo de Nampula; o Complexo de Xixano Chivarro pertence ao Grupo dos Provavelmente Supracrustais Moçambicanos ou Pré-moçambicanos (antes de 1000 M.a.) consequentemente ao Supergrupo de Chiúre. O Supergrupo do Lúrio na área de estudo é caracterizado através de granulitos máficos geralmente com escapolite(Fig.3.2).

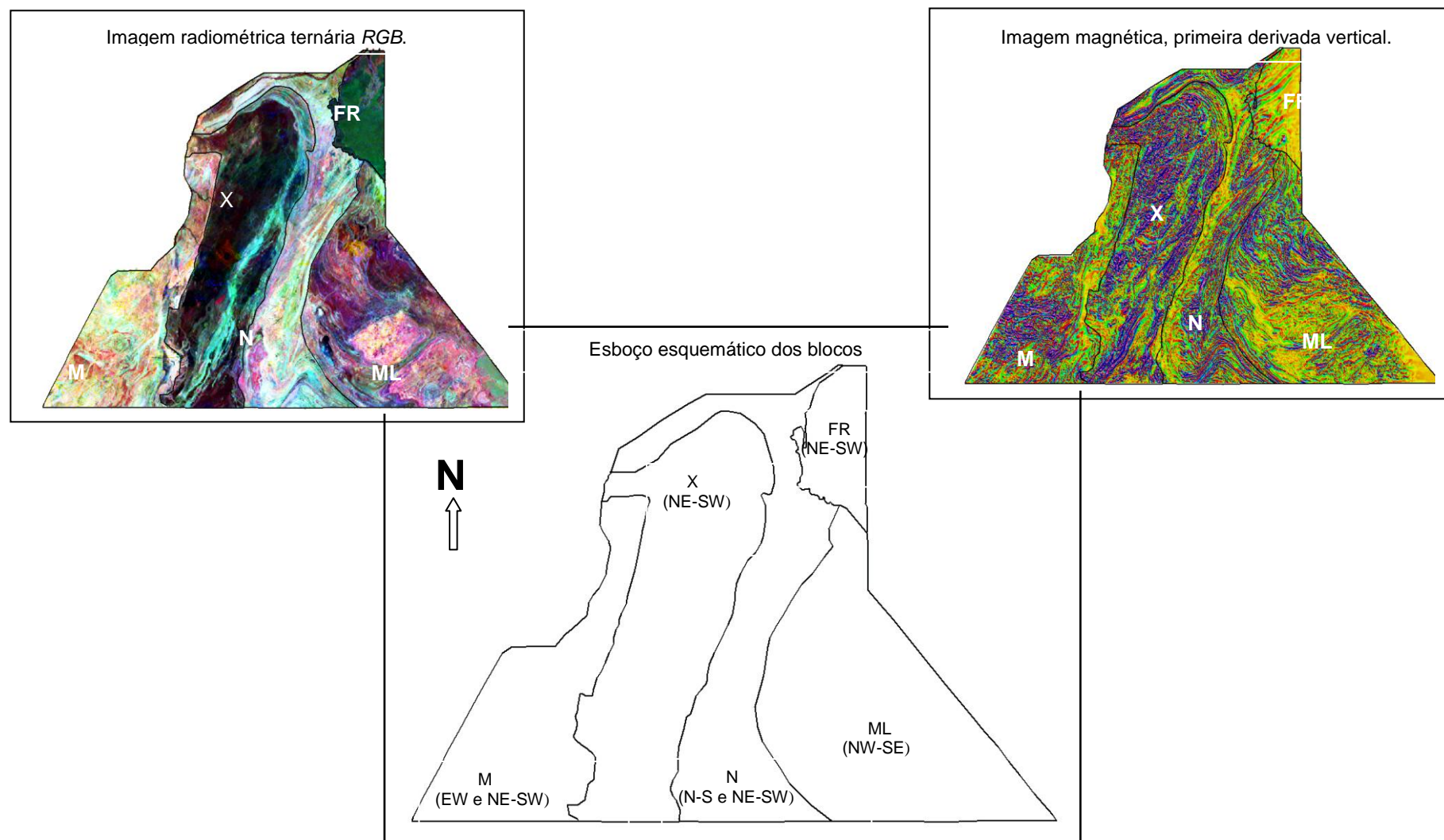


Figura 8.5 - Esboço esquemático da divisão da área de estudo em domínios, blocos estruturais dos complexos que afloram na área de estudo: Marrupa M (EW e NE-SW), Xixano chivarro X (NE-SW), Nairoto N (N-S e NE-SW), Meluco ML (NW-SE) e Formações Recentes FR (NE-SW), elaborados a partir de imagens geofísicas nomeadamente gamaespectrometria e magnética, Entre parênteses estão os respectivos domínios estruturais.

Os Supergrupos de Nampula, Chiúre e de Lúrio constituem o soco cristalino (Pré-câmbrico) do norte e nordeste de Moçambique. As formações recentes de Mikindani (Cenozóico), Macondes (Mesozóico), os grés e conglomerados avermelhados (Mesozóico) fazem parte da Bacia Sedimentar do Rovuma em Moçambique (Fig. 3.2).

A partir das análises de imagens de satélite, dos dados geofísicos e da literatura existente, pode-se dizer que a área de estudo apresenta-se polideformada, tendo sofrido três fases de deformação.

A nomenclatura das diferentes fases de deformação será adaptada a esta dissertação e designada por: primeira deformação (D_1), segunda deformação (D_2) e terceira deformação (D_3). A primeira deformação (D_1) é descrita como sendo aquela que conduziu a formação de dobras isoclinais e que os seus eixos estão orientados na direcção NNW-SSW e a segunda fase de deformação (D_2) é tida como sendo aquela que deformou os eixos das dobras formadas durante a primeira fase de deformação até a formação de dobras abertas com eixos sub-paralelos a direcção de orientação da zona de cisalhamento (WSW) e a terceira fase de deformação D_3 é caracterizada pelo cisalhamento.

A área em estudo apresenta três domínios estruturais que se distinguem pelo comportamento das foliações. Segundo a nomenclatura adaptada a esta dissertação os domínios são designados por: domínio estrutural NE-SW, domínio estrutural N-S, domínio estrutural NW-SE e domínio estrutural E-W. Na região de estudo, para além das foliações que caracterizam esta região, são também bem notáveis estruturas circulares, dobras, falhas e diques.

8.1.1- Descrição dos blocos e os respectivos domínios estruturais

Bloco de Marrupa (M)

Este bloco é caracterizado pelo Complexo de Marrupa que é formado por rochas graníticas a gneísseis tonalíticos, gneísseis anfibolíticos, quartzitos e gneísseis quartzo feldspático. Anfibolito é o tipo de rocha que caracteriza o grau de metamorfismo nesta região. Neste bloco para além de rochas metamórficas ocorrem duas manchas do Supergrupo do Karoo uma ao longo do rio Lugenda e outra no contacto entre os Complexos Xixano Chivarro e Marrupa.

As estruturas geológicas encontradas nas formações que afloram no bloco de Marrupa, definem duas direcções estruturais nomeadamente E-W e NE-SW. Deve se salientar que no Complexo de Marrupa (M) ocorre uma série de diques que é concordante a direcção NE-SW, (Fig.8.6); estes diques não estão cartografados na carta geológica de Moçambique na escala 1:1000 000 editada em 1987 (Fig.3.2).

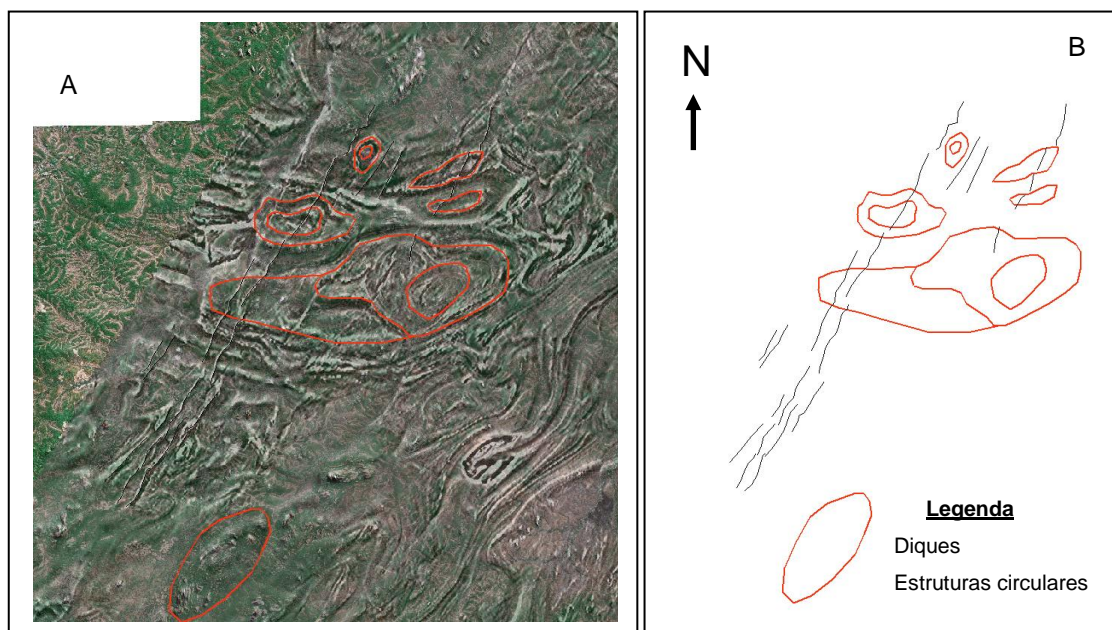


Figura 8.6 - (A) imagem da primeira derivada vertical sobreposta a imagem de satélite (mosaico) onde pode se ver diques (linhas de cor preta) e estruturas circulares (polígonos avermelhados) e (B) estruturas aflorantes no bloco de Marrupa (M) diques e estruturas circulares.

Bloco de Xixano Chivarro (X)

Este bloco é constituído por gneíseis anfibólicos laminados, micaxistos e filonitos aos quais estão associados níveis de quartzitos, mármore, gneíseis alumionosos, anfibolitos, piroxenitos, ultramafitos e gneíseis grafitosos. Este conjunto litológico é intruído pelo complexo ígneo de Xixano, constituído por gabronoritos olivínicos com diferenciados quartzodioríticos e cumulados ultramáficos retrometamorfizados. Granulitos máficos geralmente com escapolites que bordejam as formações do Xixano Chivarro (Pinna *et al.*, 1993). As estruturas geológicas do bloco em causa tomam uma direcção

estrutural preferencialmente (NE-SW). Este domínio estrutural é o mais preponderante na área de estudo e na região norte e nordeste de Moçambique.

Bloco de Nairoto (N)

De acordo com (Afonso *et al.*, 1998), o bloco de Nairoto é caracterizado pela presença de gneísseis leucocráticos e mesocráticos com biotite e hornblenda, injectado por leucossomas graníticos, pegmatíticos e aplíticos. Estes gneísseis migmatóides que se encontram laminados, lenticulados e microdobrados exibem fácies melanocratas com hornblenda e andesina. Neste conjunto, observam-se granitos, leptinitos e leucogranitos alcalinos injectados ao longo dos planos estruturais. O bloco de Nairoto apresenta uma disposição em antifórme, associada a planos de blastomilonitização.

O domínio N-S é o segundo domínio mais predominante na região de estudo e é caracterizado maioritariamente por foliações orientadas na direcção N-S. Contrariamente ao domínio estrutural NE-SW onde o cisalhamento é generalizado por todo o bloco. Em Nairoto o cisalhamento é localizado e disseminado por todo o bloco. É neste bloco onde está localizada a grande estrutura de dobramento de tipo anticlinal (Fig.8.7), que tem a sua base sobre a estrutura do Lúrio, é o bloco que se apresenta mais dobrado em relação aos restantes outros.

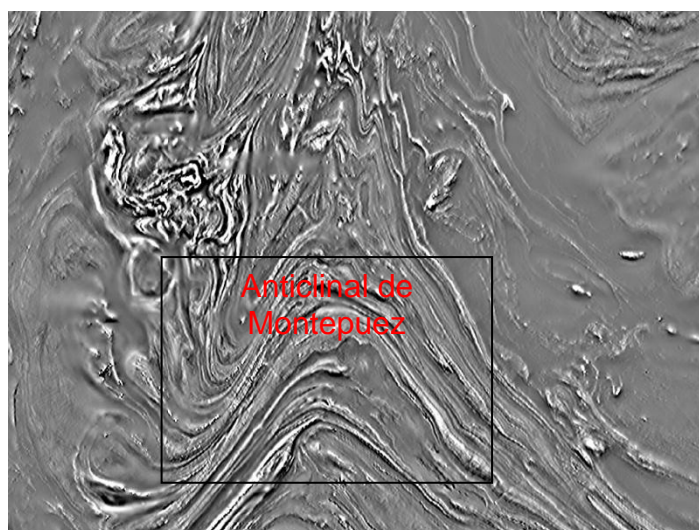


Figura 8.7- Imagem da primeira derivada vertical duma parte do bloco de Nairoto (N) ilustrando as estruturas geológicas (dobras, estruturas circulares) que afloram nesta região.

Bloco de Meluco (ML)

Este bloco tem uma constituição petrológica muito próxima da do bloco de Marrupa, com um núcleo migmatítico e com camadas superiores miloníticas. Os tipos petrográficos mais comuns são: migmatitos granodioríticos a grano-monzoníticos mesocratas, microdobrados, recortados por leucossomas graníticos com granada; leucomigmatitos de composição granítica com tendência alcalina, bandados e microdobrados; granitóides porfiróides de jazida estratóide e blastomiloníticos. Os terrenos deste bloco apresentam uma disposição estrutural em antiforme, ligada possivelmente ao antiforme redobrado de Nairoto. O bloco de Meluco é constituído por uma associação granítica-migmatítica (Pinna *et al.*, 1993). O seu domínio estrutural é caracterizado por estruturas orientadas na direcção NW-SE, geralmente são falhas, foliações e dobras. Na região em estudo, a maior parte de estruturas resultantes de cisalhamento apresentam esta orientação (NW-SE).

Bloco de formações recentes (FR)

Este bloco é composto pelas formações do Mikindani (caracterizado por grés conglomeráticos ferruginosos e areias avermelhadas) e dos Macondes que são descritos ou reconhecidos pela ocorrência de conglomerados e grés quartzo-feldspáticos, ainda neste bloco ocorrem grés e conglomerados avermelhados indiferenciados que bordejam as formações dos Macondes na área de estudo. Comparando este bloco e os restantes outros, este é o que menos estruturas apresenta, apresentando apenas algumas falhas e lineações orientadas na direcção NE-SW. Esta tendência estrutural generalisa-se um pouco por todo bloco.

8.2- Estruturas predominantes na área em estudo

8.2.1- Falhas

A tectónica da região norte e nordeste de Moçambique é muito complexa, como consequência dos diferentes eventos geológicos que outrora afectaram esta região. Do estudo feito e que culmina com a elaboração desta dissertação viu-se que a área em estudo foi poli-deformada e consequentemente muito falhada. O mapa da figura.8.8, mostra a densidade de falhas da área de estudo. As falhas digitalizadas na área de estudo, foram identificadas por

diferenciação brusca e linear dos domínios radiométricos, por diferenciação espectral das unidades geológicas, por descontinuidades das anomalias magnéticas. Quando se faz a sobreposição do mapa da figura 8.8 com o mapa geológico (Fig.3.2), algumas estruturas e alguns limites das unidades geológicas coincidem com as cartografadas no mapa geológico e outras não. De salientar que neste estudo, as falhas apenas foram identificadas e cartografadas mas não foi feito o estudo cinemático das mesmas.



Figura 8.8- Mapa de densidade de falhas da área de estudo.

8.2.2- Estruturas circulares

As estruturas circulares ou semi-circulares são muito importantes durante a interpretação geológica-estrutural pois, representam as possíveis intrusões ígneas na região de estudo ou apenas estruturas de dobramento. Na área de estudo estas estruturas encontram-se desseminaladas ocupando a segunda posição depois das falhas.

O mapa da figura 8.9 mostra algumas estruturas circulares cartografadas na área em estudo. As estruturas circulares aqui referidas, apresentam-se achatadas e lenticulares, o que significa que ocorreu neste local um evento de cisalhamento e que estas estruturas são anteriores ao cisalhamento. O aspecto lenticular e o achatamento são consequências do cisalhamento. O processamento e interpretação de dados aerogeofísicos desempenha um papel muito importante na cartografia destas estruturas, toda via, os bordos destas

estruturas circulares são preenchidos por materiais com anomalias positivas podendo ser facilmente identificadas.

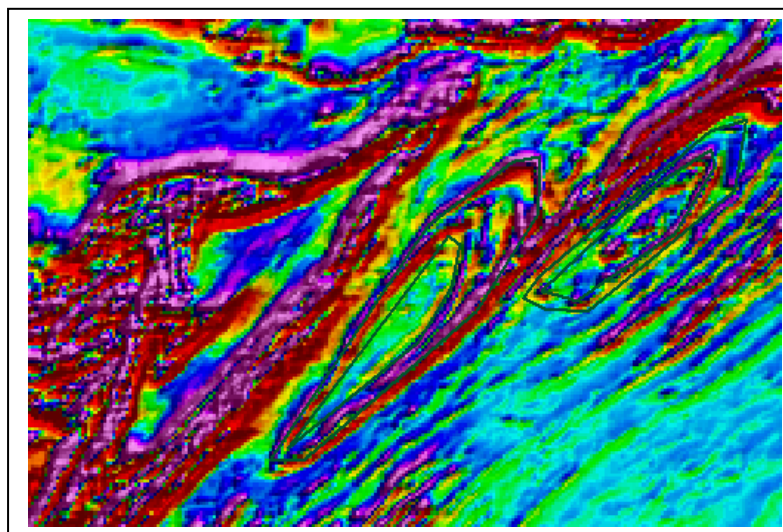


Figura 8.9 - Mapa da imagem da primeira derivada vertical ampliada, mostrando estruturas circulares simbolizadas pelas linhas verdes, que sofreram efeitos de cisalhamento e tendo sido deformadas (alongadas e achatadas). Aqui está patente a terceira fase de deformação (D_3) caracterizada pelo cisalhamento.

Na área em estudo para além das estruturas circulares alongadas e achatadas como as descritas acima, ocorrem também estruturas circulares, que se presume que não tenham sofrido efeitos de cisalhamento. Este facto é justificado pela ausência de achatamento e alongamento. Este grupo de estruturas circulares foi cortado por diques que se encontram disseminados neste local. Os bordos das estruturas circulares e os diques apresentam anomalias positivas (Fig.8.6).

Contrariamente às estruturas circulares acima descritas (aquelas que sofreram cisalhamento e as que não sofreram), na área de estudo ocorre ainda um terceiro tipo de estruturas circulares, estas apresentam-se sob a forma de anéis, com os bordos anelares mostrando a susceptibilidade magnética positiva. Elas são interpretadas como intrusões, anteriores ao processo de falhamento que ocorreu neste local (Fig.8.10).

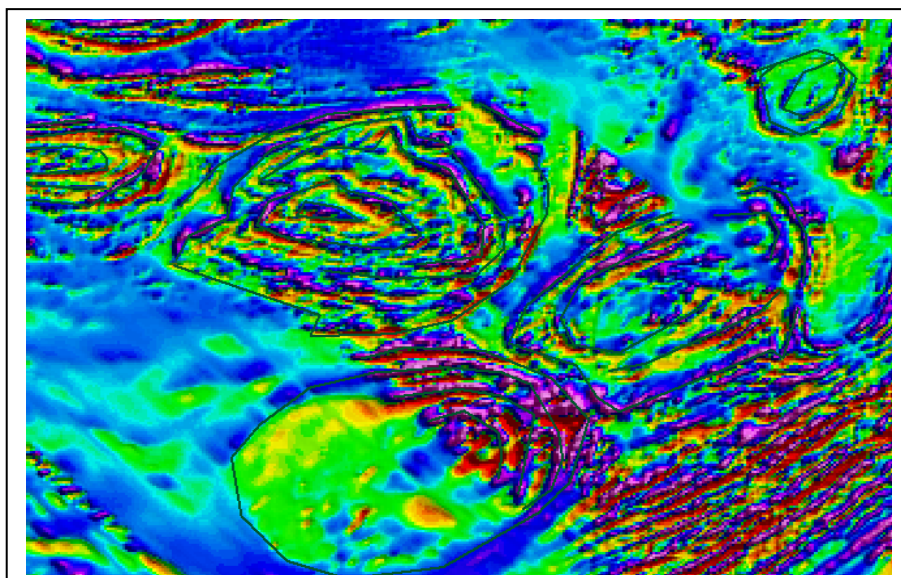


Figura 8.10 - Imagem da primeira derivada vertical ampliada ilustrando estruturas circulares sob a forma de anéis (linhas verdes).

8.2.3 - Diques

A região NW com coordenadas: (UTM: 378591, 8602599) da área de estudo (bloco M), apresenta uma série de diques com direção NE-SW, (Fig.8.6) e que apresentam anomalias positivas.

Os diques aqui citados, cortam as estruturas circulares que afloram neste local, o que pressupõe que estes diques sejam mais recentes em relação as estruturas circulares. De salientar que no actual mapa geológico 1:1000000 em uso em Moçambique, não está cartografada a série de diques acima referida.

A tabela 8.1 resume as evidências das fases de deformação que afectaram a área de estudo

Tabela 8.1- Evidências das fases de deformação predominante em cada bloco.

Fase de deformação	Bloco (M)	Bloco (N)	Bloco (ML)	Bloco (X)	Bloco (FR)
D ₁	- foliações - dobras - falhas	-foliações - dobras -falhas	-foliações -dobras -falhas	- foliações -dobras -falhas	-
D ₂	-dobras	- dobras	-	- dobras	-
D ₃	- zonas de cisalhamento	- zonas de cisalhamento	-	- zonas de cisalhamento	-
Outras estruturas ^(*)	- diques	-Estruturas circulares	-	-	-

(*) Não descrevem fase de deformação.

Estas fases de deformação foram descritas por (Pinna *et al.*,1993), como sendo de primeira fase de deformação (DP₁), segunda fase de deformação (DP₂) e terceira fase de deformação (DP₃).

8.3 - Interpretação dos dados radiométricos

A interpretação de levantamentos gamaespectrométricos deve ser efectuada na direcção da aplicação do conhecimento sobre os processos que controlam a distribuição dos radioelementos em rochas e solos para o realce e processamento dos dados. Esse processo de interpretação é apoiado pelo uso de sistemas de informação geológica com atributos de processamento de imagens, permitindo a integração digital de dados gamaespectrométricos com outros tipos de dados.

A análise dos mapas compreendeu as seguintes etapas, resumidamente:

- análise de imagem de satélite (mosaico).
- análise da imagem do modelo digital de elevação de terreno (MDT).
- análise das imagens dos canais de potássio, tório e urânio, individualmente e sobre o modelo digital de elevação de terreno com objectivos de estudar a influência do relevo sobre os dados.
- uso das imagens compostas *RGB* (K-U-Th) e *CMY* (K-U-Th) isoladamente e sobre o modelo digital de elevação de terreno (MDT) para definir unidades e/ou domínios com assinaturas gamaespectrométrica semelhantes.

A interpretação qualitativa de todas as imagens gamaespectrométricas geradas para este trabalho foi efectuada em ambiente Sistema de Informação Geográfica (SIG).

8.3.1- Modelo digital de elevação do terreno (MDT)

A análise das respostas gamaespectrométricas mostrou que o relevo topográfico do modelo digital de elevação de terreno, influencia a interpretação das respostas em mapas. A topografia mais elevada, normalmente tende a concentrar o elemento tório, enquanto que o potássio tende a concentrar nas encostas. Nos vales e leitos dos rios tem-se uma contagem radiométrica mais

baixa, com concentrações, principalmente de potássio e urânio, devido à mobilidade desses dois elementos.

8.3.2- Potássio

A imagem do canal de potássio sobreposta ao modelo digital de elevação de terreno mostra que as maiores concentrações desse radioelemento encontram-se nas encostas dos planaltos. A presença de baixas concentrações de potássio em regiões com drenagem mostra que esse elemento sofre lixiviação. Algumas intrusões ígneas da área em estudo mostram concentrações elevadas deste elemento como pode-se observar na figura 8.11.

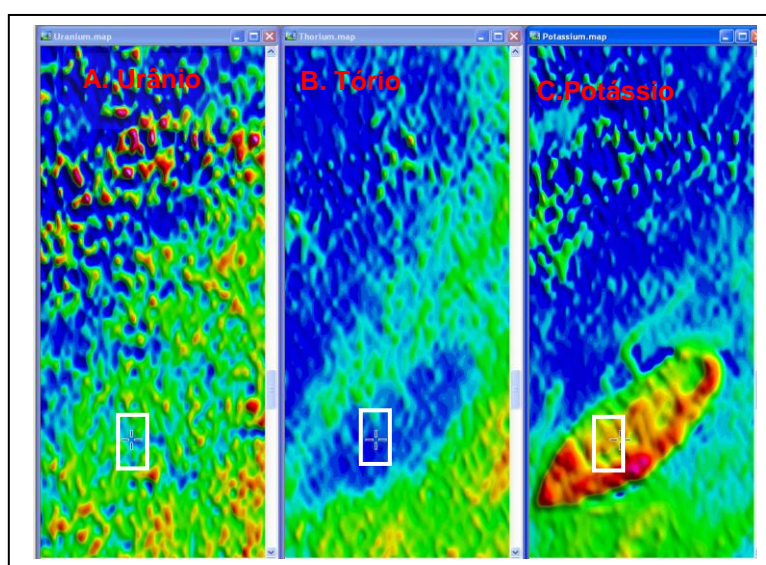


Figura 8.11- Imagem gamaespectrométricos individual de (A) urânio, (B) tório e (C) potássio

A figura 8.11 ilustra a importância das técnicas radiométricas no mapeamento geológico a partir da identificação de corpos enriquecidos em um determinado radioelemento. Analisando esta imagem constata-se que o corpo com anomalias positivas de K é inexistente no canal de urânio (Fig.8.11A) e no canal de tório é cartografado apenas o seu molde através de anomalias negativas de tório (Fig.8.11B). Contrariamente aos dois primeiros canais em análise o mesmo corpo é muito bem identificado pelo canal de potássio através das suas anomalias positivas (Fig.8.11C).

8.3.3- Tório

A imagem do canal de tório mostra claramente a pouca mobilidade desse elemento. Através dessa imagem foi possível seleccionar zonas ou unidades geológicas que apresentam altas concentrações deste elemento. O uso da imagem de tório sobreposta ao modelo digital de elevação de terreno da área em estudo serviu como instrumento de avaliação do comportamento desse radioelemento com relação ao terreno e, por conseguinte, no auxílio da caracterização das diversas unidades gamaespectrométricas. A análise da imagem de tório sobreposta ao modelo digital de elevação de terreno mostra que as maiores concentrações de tório têm uma estreita relação com as áreas de topografia mais elevada.

8.3.4- Urânio

As concentrações mais elevadas desse radioelemento são observadas nas zonas topograficamente mais baixas. Durante a interpretação de dados gamaespectrométricos a imagem de urânio foi aquela que não mostrou coerência nas suas respostas e assinaturas, possivelmente por se tratar de um elemento com uma elevada mobilidade e com mais baixo teor em rochas da crosta terrestre.

8.3.5- Contagem total

A interpretação da imagem de contagem total permite fazer uma análise conjunta das discriminações para que se tenha uma ideia do que efectivamente contribui na formação do relevo gamaespectrométrico revelado neste canal. A partir deste canal também é possível estudar os lineamentos que, em maioria, representam contactos entre as grandes unidades geológicas. A imagem do canal de contagem total da área de estudo mostra anomalias positivas nos blocos de Marrupa (M) e Nairoto (N).

8.3.6- Imagens ternárias (RGB e CMY)

Para este trabalho foram produzidos dois tipos de imagens ternárias, nomeadamente composições *RGB* e *CMY*. Nos dois casos a cada um dos três canais gamaespectrométrico K, U e Th, foi atribuído uma cor específica. Na imagem formada, cada pixel reproduz a tonalidade de cor que reflecte os valores relativos de intensidade de radiação gama entre os três canais componentes.

Para a composição RGB, foi atribuído ao canal de potássio a cor vermelha, de tório cor verde e ao de urânio cor azul. Na composição CMY, o canal de potássio corresponde ao ciano, o canal de tório ao magenta e finalmente o canal de urânio corresponde a cor amarela. Estas imagens foram utilizadas para definir os grandes blocos mas também podem ser utilizadas para a separação das unidades gamaespectrométricas numa determinada área assim como na digitalização de intrusões.

Dentre as técnicas utilizadas, as imagens ternárias mostraram ser excelentes discriminadores gamaespectrométricos. A combinação dos três elementos em apenas um mapa permite distinguir variações internas das grandes unidades definidas no mapa de contagem total. A interpretação envolveu a análise visual das imagens.

Essas imagens ternárias foram sobrepostas ao modelo digital de elevação de terreno, por que tais sobreposições realçam significativamente as definições das unidades gamaespectrométricas e evidenciam cada vez mais a separação das unidades que mapeiam diferentes tipos de unidades geológicas.

O uso das imagens RGB (Fig.7.6A) e CMY (Fig.7.B), sobrepostas ao MDT também serve para avaliar o comportamento dos radioelementos em relação à topografia do terreno e, por conseguinte, na caracterização das diversas unidades gamaespectrométricas.

Da interpretação dos dados radiométricos (dos canais individuais dos radioelementos) foi elaborada a Tabela 8.2, tendo como base uma análise qualitativa dos dados onde foram definidos os seguintes intervalos de teores: X_1 - Muito baixo à baixo; X_2 - Baixo à alto e X_3 - Alto à muito alto.

Tabela 8.2 - Resumo da análise qualitativa dos teores dos radioelementos

Radioelemento	Bloco (M)	Bloco (N)	Bloco (ML)	Bloco (X)	Bloco (FR)
K (%)	X_3	X_3	X_3	X_1	X_1
eTh _(ppm)	X_3	X_3	X_2	X_1	X_1
eU _(ppm)	X_2	X_3	X_2	X_1	X_1

Capítulo 9. Conclusões e recomendações

9.1- Conclusões

Atingidos os objectivos previamente estabelecidos para o presente estudo conclui-se que:

- os métodos geofísicos aeromagnético e radiométrico aplicados neste trabalho produziram resultados de qualidade e com um bom grau de confiança. Neste estudo foi possível cartografar estruturas geológicas (diques) no bloco de Marrupa, que não constam na carta geológica de Moçambique na escala 1:1000000 (Fig. 3.2) actualmente em uso; a partir deste estudo foi confirmada na área em estudo a ocorrência de três fases de deformação nomeadamente: D_1 , D_2 e D_3 ; que outrora foram cartografadas por (Pinna *et al.*, 1993).
- dos mapas geofísicos utilizados neste trabalho, o da primeira derivada do campo magnético anómalo é o que mais serve para a interpretação estrutural em relação aos mapas radiométricos. Devido ao facto de as estruturas geológicas geralmente são mais profundas, estas não são cartografadas pelos métodos radiométricos pois a radiometria é mais superficial do que a magnetometria.
- a imagem radiométrica ternária RGB é que mais se adequa para interpretação dos litotipos em relação à imagem da primeira derivada vertical (1VD), já que a imagem radiométrica ternária dá-nos informação acerca de domínios radiométricos das rochas que ocorrem na área em estudo. A imagem 1DV dá-nos informação acerca de estruturas geológicas.
- algumas estruturas circulares que ocorrem na área em estudo indicam a presença de um evento de cisalhamento (terceira fase de deformação), pois estas estruturas apresentam-se achatadas e lenticulares, diferenciando-se de outras estruturas circulares cartografadas na área em estudo.
- a complexidade das falhas, diaclases, zonas de cisalhamento, dobramentos mostradas pela primeira derivada do campo magnético

anómalo é indicativo de uma intensa actividade tectónica que afectou a região norte e nordeste de Moçambique.

- na área em estudo, existem três domínios estruturais (NE-SW), NS e NW-SW correspondentes às três fases de deformação Pan-africana (DP_1 , DP_2 e DP_3) (Fig. 3.2).
- analisando os mapas de soluções de *Euler*, pode-se concluir que os índices estruturais 0 e 1 são os que mostraram bons resultados quando comparados com os índices 2 e 3. Isto significa que na área em estudo não ocorrem estruturas de tipo cilindro horizontal ou vertical e esfera ou dipolo mas sim diques e contactos.
- A técnica da Deconvolução *Euler* aplicada ao mapa do sinal analítico apresentou menor quantidade de nuvens de soluções e consequentemente melhores resultados na estimativa de profundidades em relação as outras duas opções por que esta técnica aplicada ao mapa do sinal analítico gera soluções acima do valor do *cutoff*, por isso apresenta menor quantidade de nuvens de soluções.
- os mapas individuais de Th, K e U reflectem a distribuição destes radioelementos no ambiente. Neste estudo estes mapas permitem concluir que na área em estudo o Th apresenta maior teor (23.471 ppm) (Fig. 7.4B) seguido do K (4.388 %) (Fig. 7.4A) e urânio (4.142 ppm) (Fig. 7.5). Estes mapas permitem também a visualização das anomalias radiométricas associadas a cada formação litológica. Enquanto que o mapa de contagem total têm de teor (3250,957ppm) (Fig. 7.3) que reflecte o somatório das medidas radiométricas da contribuição dos três radioelementos (K, U e Th).
- os minerais de zircão e monazite, podem ser considerados minerais guia para a prospeção do U e Th já que estes minerais são estáveis aos efeitos dos agentes do intemperismo.

9.2- Recomendações

Depois do estudo levado a cabo na região nordeste de Moçambique, o autor desta dissertação recomenda :

- um estudo pormenorizado das diferentes fases de deformação que tiveram acção na região norte e nordeste de Moçambique para melhor compreender a evolução geológica da região norte e nordeste de Moçambique.
- um estudo de identificação dos prováveis depósitos minerais que ocorrem na região pois as imagens da primeira derivada vertical e ternária radiométrica mostram que esta região sofreu falhamentos, podendo estas zonas de falhamento serem susceptíveis à ocorrência de mineralizações. Este estudo poderá culminar com a elaboração da carta de ocorrências e de jazigos minerais.
- um estudo sobre a cinemática das falhas da área de estudo para identificar e cartografar os diferentes tipos de falhas e possíveis causas. Este estudo poderá culminar com a elaboração da carta tectónica da área de estudo ou da região norte e nordeste de Moçambique.
- um estudo capaz de associar os dados aerogeofísicos já existentes aos dados de sondagens, dados sobre jazigos ou ocorrências minerais já existentes na área de estudo de modo a fazer um estudo comparativo. Este estudo poderá conduzir a descoberta de novas ocorrência ou jazigos minerais.
- à DNG, um levantamento geofísico usando os métodos da geofísica terrestre para certificar no terreno as anomalias detectadas pela geofísica aérea.
- à DNG, fazer cartas grandes deste trabalho afim de estarem disponíveis para consulta.

• **Referência bibliográfica**

- AFONSO, R.S., MARQUES, J.M and FERRARA, M., (1998)** - A Evolução Geológica de Moçambique. Pp 32-44 Lisboa e Maputo, Instituto de Investigação Científica Tropical Direcção Nacional de Geologia.
- ANDREOLI, M.A.G., (1984)** - Petrochemistry, tectonic evolution and metasomatic mineralisations of Mozambique belt granulites from S Malawi and Tete (Mozambique). *Precambrian Research* 25, pp 161-186. Great Britain, Elsevier Science.
- ARYA, A.P., (1966)** - Fundamentals of Nuclear Physics. Boston: Allyn and Bacon Inc.
- ATLAS GEOGRÁFICO., (1986)** - Vol. I, 2ª Edição, Ministério da Educação, República Popular de Moçambique, Direcção Nacional de Geologia.
- BLUM M.L., (1999)** - Processamento e interpretação de dados de geofísica aérea no Brasil Central e sua aplicação à geologia regional e à prospecção mineral. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Tese de Doutorado, 229 p.
- BOYLE, R.W., (1982)** - Geochemical prospecting for thorium and uranium deposits. *Developments in Economic Geology*, n.16, p. 71-78.
- CROSTA, A.P., (1993)** - Processamento digital de imagens de detecção remota. Campinas, SP, IG/UNICAMP. 170 Páginas.
- DICKSON, B.L.; SCOTT, K. M., (1997)** - Interpretation of aerial gamma-ray surveys - adding the geochemical factors. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, Australia, v.17, n. 2, p. 187-200.
- DUTRA, L.V. & MENESES, P.R., (1987)** - Realce de cores em imagens de detecção remota. Utilizando rotação de matiz no espaço IHS. In: Simp. Brás. TELECOM. Campinas, 1987. Anais... Capinas, p. 205-212.
- FREITAS, A.J., (1957)** - Notícia explicativa do esboço geológico de Moçambique (1 : 2 000 000). Acompanhada de carta e de uma bibliografia geológica). *Boletim do Serviço de Geologia e Minas* 23.Pp 29-37. Maputo, Direcção Nacional de Geologia.
- GEOSOFT., (1995)** - GEOSOFT mapping and processing system. GEOSOFT, Inc., Toronto.
- GRASTY, R.L., (1975)** - Gamma-ray spectrometric methods in uranium exploration - theory and operational procedures. *Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores*. Geological Survey of Canada, Economic Geologic Report, v. 31, p.147- 161.
- HOLMES, A., (1951)** - The sequence of Pre-cambrian orogenic belts in South and Central Africa. 8th International Geological Congress. Great Britain 1948, part XIV, pp 254-269.
- HOLMES, A., (1918)** – *The Precambrian and associated rocks of the district of Mozambique*. *Q.J. Geol. Soc. London*, LXXIV (1).
- HSU, S., SIBUET, J.C., SHYU C., (1996)** – High-resolution detection of geologic boundaries from potencial-field anomalies: an enhanced analytic signal technique. *Geophysics*, Vol. 52, N° 1; p. 118-121.
- I.N.G., (1987)** - Carta geológica 1:1000000, Ministério dos Recursos Minerais de Moçambique. Maputo, Direcção Nacional de Geologia.
- IAEA., (2003)** - Airborne Gamma-Ray Spectrometer Surveying, Technical Reports Series 323, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- JAMAL, D.L., ZURTMAN, R.E. AND DE WIT, M.J., (1999)** - U-Th-Pb Single Zircon Dates from Lurio belt, Northern Mozambique-Kibarian and Pan-African Orogenic Events highlighted. *Journal of African Earth Sciences* 28, n° 4A. Great Britain, Elsevier science.
- JOURDE, G. & WOLFF, J.P., (1974)** - Com a colaboração de TROTTEREAU, G. contribuição para o conhecimento da geologia de Montepuez (grau quadrado 1338). pp 10-30. Maputo, Direcção Nacional de Geologia.

- JOURDE, G. & WOLFF, J.P., (1974)** - Com a colaboração de TROTTEREAU, G. contribuição para o conhecimento da geologia de Ribáuè (grau quadrado 1438).Pp 31-51. Maputo, Direcção Nacional de Geologia.
- KEAREY, P. & BROOKS M., (1991)** - An introduction to geophysical exploration. 2nd edition. Oxford: Blackwell Scientific.
- KILEEN, P.G., (1979)** - Gamma-ray spectrometric methods in uranium exploration – application and interpretation. Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores. Geological Survey of Canada, Economic Geologic Report, v. 31, p.163-229.
- KRÖNER, A., SACCHI, R., JAECKEL, P. AND COSTA, M., (1997)** - Kibarian magmatism and Pan-african granulite metamorphism in northern Mozambique: single zircon ages and regional implications. *Journal of African Earth Sciences* 25, pp 460-485. Great Britain, Elsevier Science.
- LILLESAND, THOMAS M., (1994)** - Remote sensing and image interpretation-3rd ed. Digital image processing 7. Pp 524-634. Maputo, Direcção Nacional de Geologia.
- LOURENÇO, J.M.M., (2006)** - Contribuição para o conhecimento do modelo geológico estrutural da Bacia de Telões por métodos geofísicos integrados. Tese de Doutoramento. UTAD., 5: 77-113.
- LOWRIE, W., (1997)** - Fundamentals of geophysics. Cambridge University Press. Cambridge England.
- MILSON, J., (1996)** - Field Geophysics. 2nd Edition. John Wiley and Sons, England.
- MINTY, B.R.S., (1997)** - Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, v. 17, n.2, p.39-50.
- MINTY, B.R.S; LUYENDYK, A.P.J.; PRODIE, R.C., (1997)** - Calibration and data processing for airborne gamma-ray spectrometry. AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, v. 17, n.2, p.51-62.
- NABIGHIAN, M.N., (1972)** - The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross section: its properties and use for automated anomaly interpretation, *Geophysics*, 37:507–517.
- NAGATA, T., (1961)** - Rock Magnetism. Revised Edition, Tokyo, Maruzen Co. Ltd., 350 p.
- OBERHOLZER, W.F., (1968)** - Carta geológica, 1 : 2 000 000. Província de Moçambique-Portugal, DPSGM.
- PARASNIS D.S. (1997)** – *Principles of applied geophysics. 5th Edition Chapman & Hall, United Kingdom.*
- PINNA, P., JOURD, G., GALVEZ, J. Y., MROZ, J. P. & MARQUES, J. M., (1993)** - The Mozambique belt in northern Mozambique: Neoproterozoic (1100-850 M.a.) crustal growth and tectonogenesis, and superimposed Pan-African (800-550) tectonism. *Precambrian Research* 62, pp 1-59. Great Britain, Elsevier Science.
- PINNA, P., MARTEAU,P.; BECQ-GIRAUDON,J.;MANIGAULT, B (1987)** – *carta geológica da república Popular de Moçambique, 1/1000000 B.R.G.M. Instituto Nacional de Geologia., Maputo, 2 fls*
- REID, A.B., ALLSOP, J.M., GRANSER, H. MILLETT, A.J. & SOMERTON, I.W., (1990)** - Magnetic interpretation using Euler deconvolution. *Geophysics*, 55, 80-91.
- REYNOLDS, J.M., (1997)** - An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. John Wiley & Sons. Inglaterra. 796p.
- SHARMA, P.V. (1986)** – *Geophysical methods in geology.2nd Edition, Elsevier Science, New York.*
- TELFORD, W.M., GELDART, L.P., SHERIFF, R.E. & KEYS, D.A., (1990).** Applied geophysics. 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge, England.
- WATANABE, H. & YUKUTAKE, T., (1975)** - Electromagnetic core-mantle coupling associated with changes in the geomagnetic dipole field. *J. Geomag. Geoelect.*, 27: 153-173.
- WILFORD, J.R.; BIERWIRTH, P.N.; CRAIG, M.A., (1997)** - *Application of gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and geomorphology. AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, v. 17, n.2, p.201-216.*

• **Bibliografia**

- AFONSO, R.S., (1975)** - A geologia das regiões de Muíte, Montepuez-Balama e Moma. Província de Moçambique Portugal, SPGM.
- AQUATER., (1983)** - Carta geológica da foz do Lúrio, 1 :250000. Maputo, Direcção Nacional de Geologia.
- BLAKELY, R.J., (1995)** - Potencial Theory in Gravity and Magnetic Applications. Cambridge University Press, Cambridge, p. 441
- BRGM., (1987)** - Notice explicative de la carte geologique 1 :1000000 de la Republique populaire du Mozambique. Maputo, Direcção Nacional de Geologia.
- BULGARGEOMIN., (1983)** - Carta geológica, 1 :100000. Folhas 1339-B, 1339-D, 1340-A, 1339-D₂. Maputo, Direcção Nacional de Geologia.
- CARVALHO L.M.M., (2006)** - Integração de dados de Geofísica aérea aplicada à geologia e à prospecção mineral no Distrito esperaldífero de Itabira-Ferros, Quadrilátero ferrífero, MG. Tese de (Doutoramento). IG-UnB.
- CARVALHO, L.M.M., (1999)** - Aspectos mineralógicos, geoquímicos e das inclusões fluidas das esmeraldas e águas-marinhas das minas de Belmont (Itabira) e Santa Galo (Nova Era), Estado de Minas Gerais. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 159 p.
- CONWAY, ERIC D., (1997)** - And the Maryland Space Grant Consortium : an Introduction to Satellite Image Interpretation. Pp 26-41. Departamento de geologia -UEM.
- CROSTA, A.P., (1992)** – Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto. Ed. rev. Campinas, SP: IG/UNICAMP, 170p.
- GEOSOFT., (2006)** - OASIS Monta^j_{TM}, V. 6.4.1.(6G) Geosoft, Inc., Toronto.
- HSU, S.K.; SIBUET, J.C. & SHYU, C.T., (1996)** - High-resolution detection of geological boundaries from potencial-field anomalies: an enhanced analytical signal technique. *Geophysics*, 61(2): 373-386.
- KRÖNER, A., (1983)** - African linkage of precambrian Sri Lanka. *Geologische Rundschau* 80, pp 430-440.
- KRÖNER, A., (1983)** - Pan-African crustal evolution. *Episodes* pp 5-10.
- MCCLAY, K., (1992)** - The mapping of geological structures. Pp 161, Chichester, John Wiley and Sons.
- MINTY B.R.S., (1991)** - Simple micro-levelling for aeromagnetic data. *Exploratio Geophysics*, 22: 591-592.
- OBERHOLZER, W.F. E AFONSO, R.S., (1977)** - Carta tectónica , 1 : 200 000. Maputo, DPSGM.
- PINNA, P., (1995)** - On the dual nature of Mozambique *belt*, mozambique to Kenya. *Journal of African Earth Sciences* 21, pp 477-480. Great Britain, Elsevier Science.
- R.I. GIBSON AND P.S. MILLEGAN.** - Editors - *Geologic Applications of Gravity and Magnetics: case histories*, pp. 37-44.
- RAGAN, DONAL M., (1968)** - Structural geology and introduction to geometrical techniques. Pp 45-120. Departamento de geologia- UEM.
- S. LÄCHELT-** Noticia explicativa da carta matalogénica , geológica e tectónica de Moçambique 1 :1000 000. Maputo, Direcção Nacional de Geologia.
- S.BREINER., (1973)** - Applications Manual Portable Magnetometers, Geometrics Publication.
- SHERIFF, R. E., (1989)** - Geophysical Methods. New Jersey, Prentice Hall. 650 p.
- soil/regolith mapping and geomorphology. AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, v. 17, n.2, p.201-216.
- T. RABEH, K.O. EL FARAGAWY, J.M. MIRANDA, F.A. MONTEIRO SANTOS AND M. AHMED., (2008)** - The role geomagnetic methods in the detection of mineral deposits at El-Hody área, south-eastern Aswan, Egypt. *Near Surface Geophysics*, Volume 6, Number 3 -June 2008, pp.195-201.

TELFORD, W.M., L.P. GELDART, R.E SHERIFF E D.A. KEYS., (1976) - "Applied Geophysics". Cambridge University Press, pp 860.

THOMPSON D.T., (1982) - Eulph. A new technique for making computerassisted depth estimates from magnetic data. Geophysics 47: 31-37.

WRIGHT, P.M., (1981) - *Gravity and magnetic methods in mineral exploration. Economic Geology, 75th Anniversary.*

- **Sites consultados**

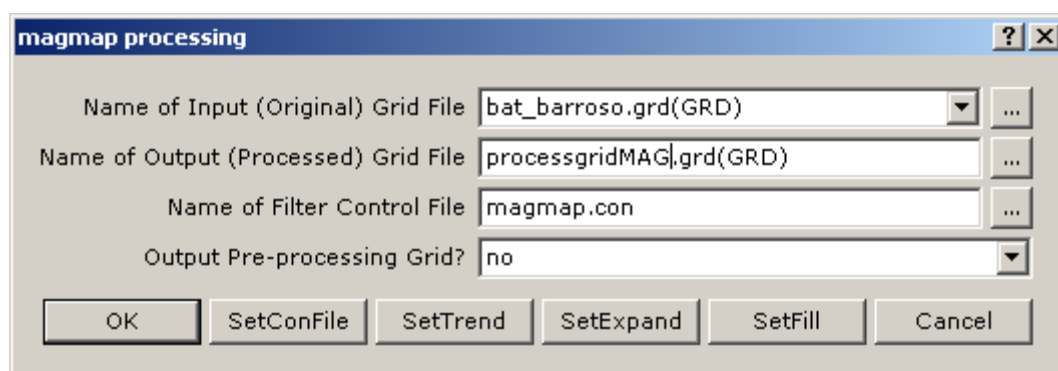
- <http://www.google.pt/search?hl=pt-PT&q=processamento+aerogeofisico&btnG=Pesquisa+do+Google&meta=&aq=f&oq=>
- http://www.lapig.iesa.ufg.br/sgm/downloads/publicacoes/Chiarini_SBGf0093_07.pdf
- <http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/rbg/article/viewFile/8255/8974>
- <http://scitation.aip.org/getpdf/servlet/GetPDFServlet?filetype=pdf&id=GPYSA70000710000010000L5000001&idtype=cvips&prog=normal>
- http://www.ga.gov.au/image_cache/GA2485.pdf
- <http://www.colegiosaofrancisco.com.br/alfa/mocambique/cabo-delgado.php>
- <http://www.google.com.br/search?hl=ptPT&q=descricao+dos+metodos+aerogeofisicos&btnG=Pesquisa+Google&meta>
- http://ess.nrcan.gc.ca/2002_2006/nrd/slavecomp/radiometric_e.php

Anexos

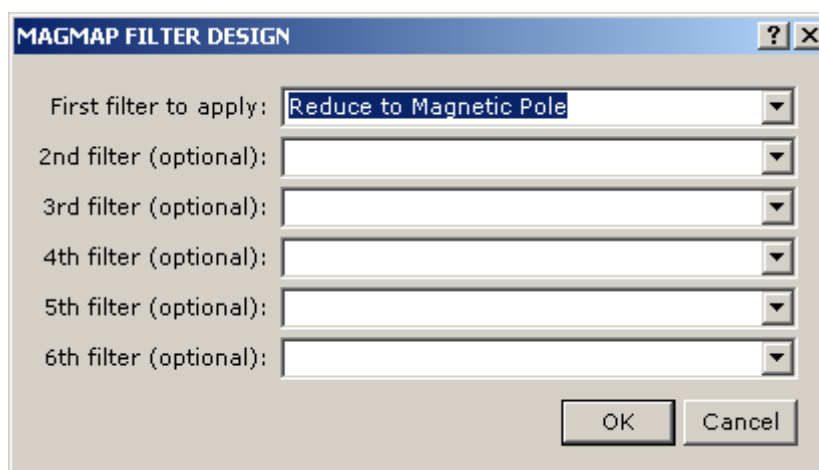
A.1 - Procedimentos da aplicação do filtro de redução ao pólo usando o Oasis Montaj 7.0

Aplicação do filtro de redução ao pólo usando o Oasis montaj 7.0

Seguem as instruções de como aplicar o filtro de Redução ao Pólo através do *MAGMAP*. Assim como todos os outros filtros do *MAGMAP*, o de Redução ao Pólo pode ser usado através do menu *MAGMAP* -> *MAGMAP 1-STEP FILTERING*. Na caixa de diálogo que será aberta selecione a grelha que deseja filtrar (neste anexo foi selecionado: *bat_barroso.grd*), dê um nome para a grelha de saída (ex: *processgridMAG*), escolha um nome para o arquivo de controle de filtro (*Name of filter control file (*.con)*).



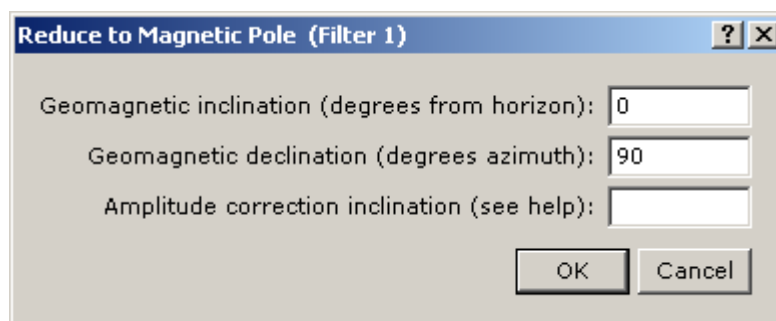
Clique em *SetConFile* para escolher que filtro deseja usar.



Na caixa de diálogo Magmap filter design, escolha “*Reduce to Magnetic Pole*” no primeiro campo e clique em *Ok*.

Na caixa *Reduce to Magnetic Pole (Filter 1)* digite a inclinação, a declinação e a inclinação da amplitude de correção (recomenda-se consultar o

material disponível no botão *HELP*, para melhor compreensão desse parâmetro. Clique *Ok*.



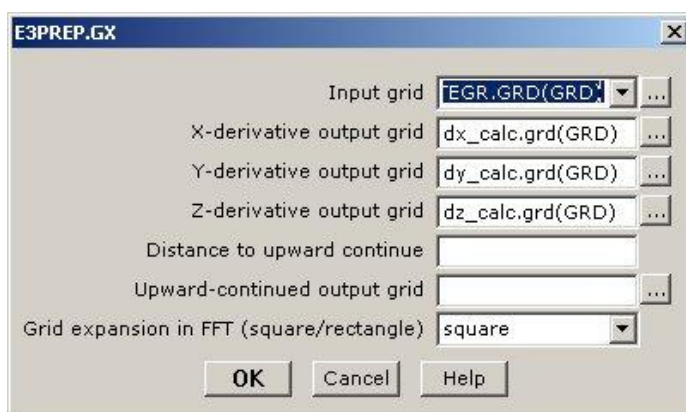
De novo, clique em *Ok*. Os parâmetros que você digitou serão utilizados para criar a nova grelha filtrada.

Bem, agora a discussão sobre o parâmetro inclinação da amplitude de correção que é o único que pode ser alterado uma vez que a inclinação e declinação dependem somente da localização. Após inúmeros testes com diferentes grelhas de diferentes localizações, verificou-se que o melhor resultado é obtido usando o complemento do valor da inclinação magnética (Geosoft, 1995): por exemplo, caso o valor da inclinação magnética seja -18° , teste fazer a redução ao pólo usando o valor -72 para a inclinação da amplitude de correção $[-18+(-72)= -90]$.

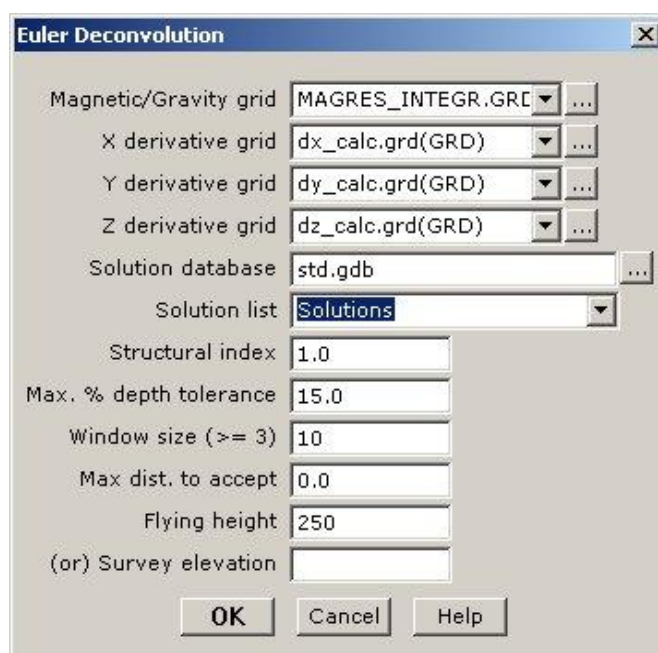
A.2 – Procedimentos para a aplicação da Deconvolução Euler3D 1a opção

Utilizando o Euler3D

Para utilizar o *Euler3D*, deve ter pelo menos uma grelha de magnetometria. Caso não a tenha, é imprescindível que tenha um banco de dados (*GDB*) com os dados necessários para criar a grelha (para tal pode usar a opção *Grid data* dentro do *menu Euler3D*). Tendo já pronta a grelha magnética, o próximo passo será, gerar as grelhas das derivadas em X, Y e Z. Para isso vá a *Euler3D-> Process grids*. Aparecerá a caixa de diálogo abaixo. Nela deverá preencher o primeiro campo selecionando a grelha magnética acima criada e os demais campos com os nomes das grelhas das derivadas que serão criadas.



Os campos “*Distance to upward continue*” e “*Upward-continued output grid*”, deve preenche-los caso queira criar uma grelha de continuação para cima. No campo “*Grid expansion in FFT (square/rectangle)*”, escolha a opção que melhor satisfaz os seus dados. (Note que: O filtro *FFT* é usado no cálculo da derivada em Z. Este procedimento envolve a expansão e preenchimento da grelha de entrada antes que seja feito o cálculo da transformada de *Fourier*. O padrão é expandir para uma grelha quadrada (*square*), mas caso a grelha de entrada seja alongada e estreita, então é melhor realizar a expansão para uma grelha retangular). Ao aceitar clicando em *Ok*, as grelhas serão criadas. A primeira opção depois de ter as grelhas preparadas é *Euler3D-> Standard Euler decon...*; através dessa opção terá acesso à caixa de diálogo que se segue:



Os quatro primeiros campos deverão ser preenchidos com as grelhas magnéticas criadas anteriormente e as três derivadas recém-calculadas. No campo “*Solution database*” deverá dar um nome ao banco de dados (GDB) que será criado com as soluções e o campo “*Solution list*” deverá ser preenchido com o nome da linha que será criada no *GDB* com as soluções encontradas. O campo “*Structural index*” deve ser preenchido com o número correspondente ao índice estrutural que se deseja mapear. Seguindo as informações do *HELP*, temos os valores a seguir que correspondem da seguinte maneira às estruturas geológicas:

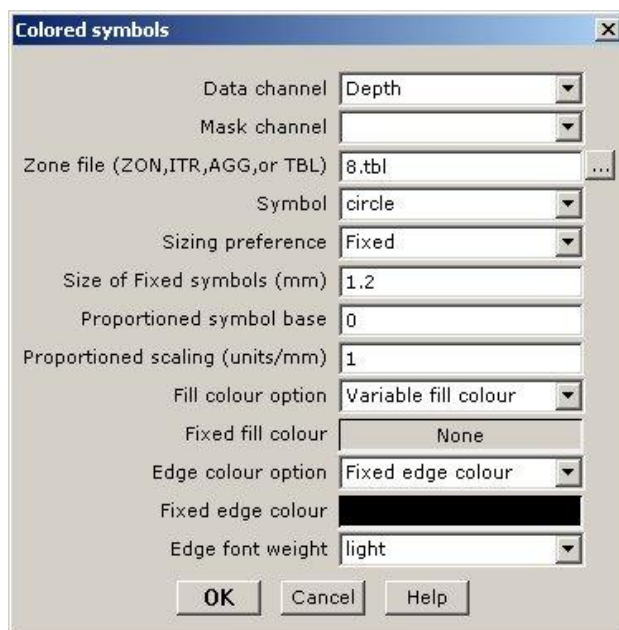
IE(SI)	Campo magnético
0	Contacto
1	Dique vertical ou soleira
2	Cilindro horizontal ou vertical
3	Esfera ou dipolo

Preencha os demais campos conforme desejar (ler o “*Help online*” caso precise de ajuda). Lembre-se que o campo “*Flyght height*” deve ser usado com a altura de voo em caso de levantamentos que variem com o relevo. E o campo “*Survey elevation*” deve ser usado em voos barométricos (ou seja, quando a elevação é constante em relação ao nível do mar).

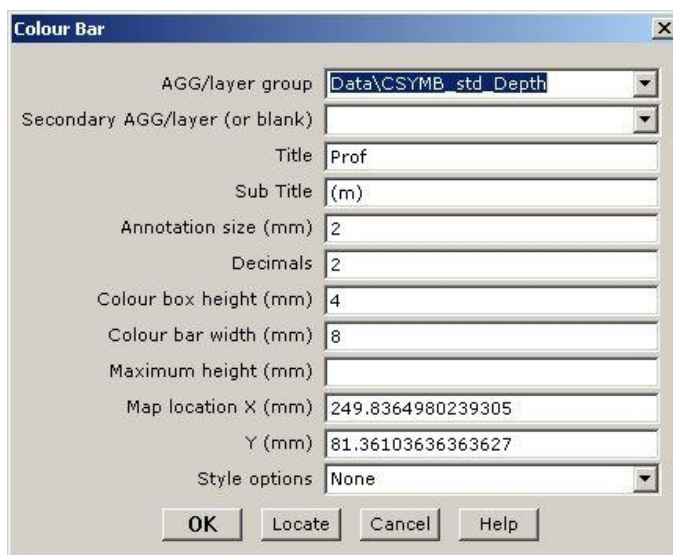
Ao clicar em *Ok* será criado o banco de dados (*GDB*) com o nome que foi escolhido anteriormente e que terá uma linha também com o nome pré-definido trazendo as soluções de *Euler*.

Linha	X	Y	X Euler	Y Euler	Depth	backgrnd	WndSize	dZ	dXY	X Offset	Y Offset	Mask
0.0	515287.50	8561812.00	515138.59	8562032.00	33.50	-0.01	750.00	13.75	28.29	-148.91	220.00	1
1.0	515287.50	8561888.00	515147.03	8562090.00	-5.95	-0.02	750.00	11.76	35.19	-140.47	202.00	1
2.0	515362.50	8561888.00	515200.97	8562127.00	6.66	-0.02	750.00	9.93	33.13	-153.53	239.00	1
3.0	515287.50	8561962.00	515160.72	8562114.00	-15.67	-0.02	750.00	11.88	34.09	-126.78	152.00	1
4.0	515362.50	8561962.00	515219.50	8562128.00	-2.42	-0.02	750.00	9.78	31.16	-143.00	166.00	1
5.0	515362.50	8562038.00	515229.84	8562175.00	-18.40	-0.02	750.00	14.82	46.10	-132.66	137.00	1
6.0	347812.50	8562188.00	347770.75	8562318.00	69.48	-0.01	750.00	6.72	14.54	-41.75	130.00	1
7.0	347887.50	8562188.00	347772.19	8562325.00	74.91	-0.01	750.00	6.33	13.41	-115.31	137.00	1
8.0	347962.50	8562188.00	347771.28	8562322.00	84.85	-0.01	750.00	6.38	13.39	-191.22	134.00	1
9.0	348037.50	8562188.00	347786.09	8562323.00	77.34	-0.01	750.00	6.32	14.87	-251.41	135.00	1
10.0	348112.50	8562188.00	347833.44	8562327.00	75.30	-0.02	750.00	5.75	16.53	-279.06	139.00	1
11.0	348187.50	8562188.00	347908.25	8562336.00	103.23	-0.03	750.00	4.67	13.52	-279.25	148.00	1
12.0	348262.50	8562188.00	347992.94	8562343.00	116.48	-0.05	750.00	6.00	13.89	-269.56	155.00	1
13.0	348337.50	8562188.00	348092.88	8562338.00	136.17	-0.06	750.00	7.27	13.43	-244.63	150.00	1
14.0	348412.50	8562188.00	348141.88	8562352.00	116.22	-0.06	750.00	9.41	17.02	-270.63	164.00	1
15.0	348487.50	8562188.00	348216.03	8562374.00	108.04	-0.06	750.00	9.90	18.55	-271.47	186.00	1
16.0	348562.50	8562188.00	348318.44	8562405.00	97.62	-0.06	750.00	10.52	19.40	-244.06	217.00	1
17.0	348637.50	8562188.00	348411.31	8562429.00	50.78	-0.05	750.00	14.64	28.06	-226.19	241.00	1
18.0	349387.50	8562188.00	349280.28	8562373.00	-7.29	-0.04	750.00	14.58	36.03	-107.22	185.00	1
19.0	349462.50	8562188.00	349342.91	8562369.00	-6.49	-0.04	750.00	14.14	34.52	-119.59	181.00	1
20.0	349537.50	8562188.00	349397.75	8562362.00	3.76	-0.05	750.00	12.82	31.70	-139.75	174.00	1
21.0	349612.50	8562188.00	349455.56	8562357.00	8.42	-0.05	750.00	11.10	31.07	-156.94	169.00	1
22.0	349687.50	8562188.00	349531.78	8562348.00	31.35	-0.05	750.00	9.09	27.88	-155.72	160.00	1
23.0	349762.50	8562188.00	349595.19	8562320.00	58.61	-0.05	750.00	9.94	25.86	-167.31	132.00	1
24.0	350287.50	8562188.00	350461.41	8562396.00	36.54	-0.05	750.00	12.42	27.36	173.91	208.00	1

Agora, já pode exibir as soluções calculadas. Para tal Crie um mapa usando a opção *Euler3D-> New map* e desenhe o mapa base usando *Euler3D-> Draw base map*. Recomenda-se, exibir a grelha da derivada vertical em tons que evidenciam as estruturas geológicas e depois disso plotam-se os símbolos das soluções de *Euler*. É possível plotar os símbolos usando a opção *Euler3D-> Plot solutions symbols-> Zone coloured* (esta primeira é uma forma mais rápida) ou *Euler3D-> Plot solutions symbols-> Colour range symbols* (com possibilidade de definir os intervalos que desejar). Nesta dissertação foi usada a opção *Zone coloured*. Ao clicar em *Euler3D-> Plot solutions symbols-> Zone coloured* será aberta a caixa de diálogo como a que a abaixo se segue. Escolhe-se os parâmetros como desejar, mas lembre-se que o canal a ser lido para plotar os símbolos deve ser o “*Depth*” (profundidade). É melhor usar oito intervalos de cores (8.tbl) no campo “*Zone file*” ao invés de usar a *colour.tbl* padrão do *Oasis* (que mostraria 256 cores).

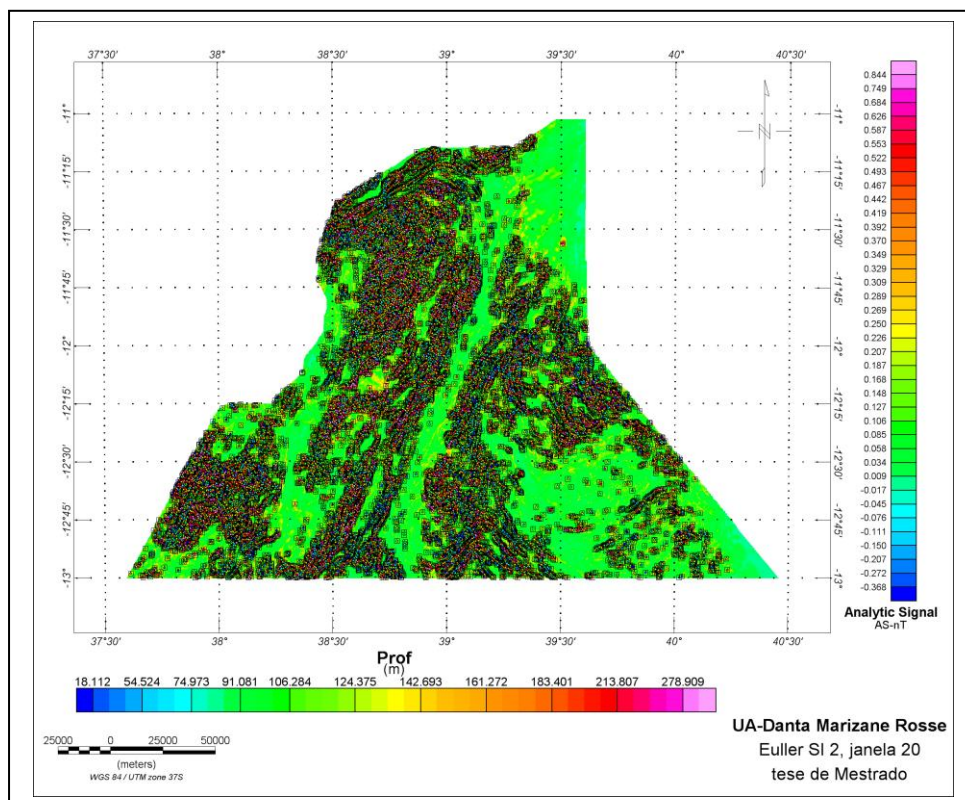


Os símbolos serão plotados no mapa. Para exibir uma legenda que relacione as cores dos símbolos com as profundidades das soluções, vá em *Euler3D-> Plot solutions symbols-> Color legend bar*. A caixa de diálogo a seguir será exibida. Escolhe para o primeiro campo o grupo dos símbolos das soluções em profundidade, preenche os demais campos como desejar e use o botão “Locate” para escolher no mapa onde seja plotar a barra de cores. Depois aceite clicando em *Ok*.



Finalmente terá um resultado semelhante como o que abaixo se segue: vá a *Euler3D-> Plot solutions symbols-> Color legend bar*. A caixa de diálogo a seguir será exibida. Escolhe no primeiro campo o grupo dos símbolos das soluções em profundidade, preenche os demais campos como desejar e usa o

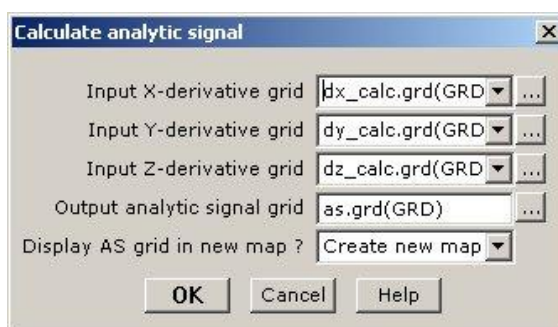
botão “Locate” para escolher no mapa onde deseja plotar a barra de cores. Depois clique em *Ok*.



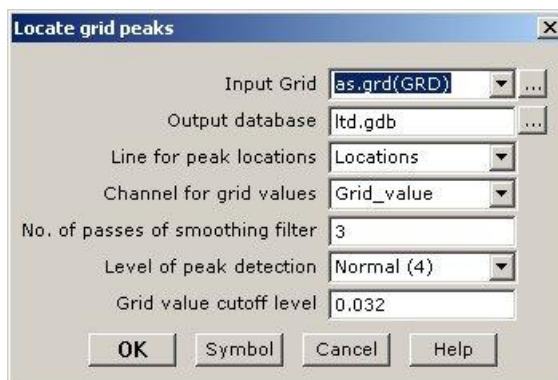
A.3 – Procedimentos para a aplicação da Deconvolução *Euler3D* 2a opção

Utilizando o *Euler3D*

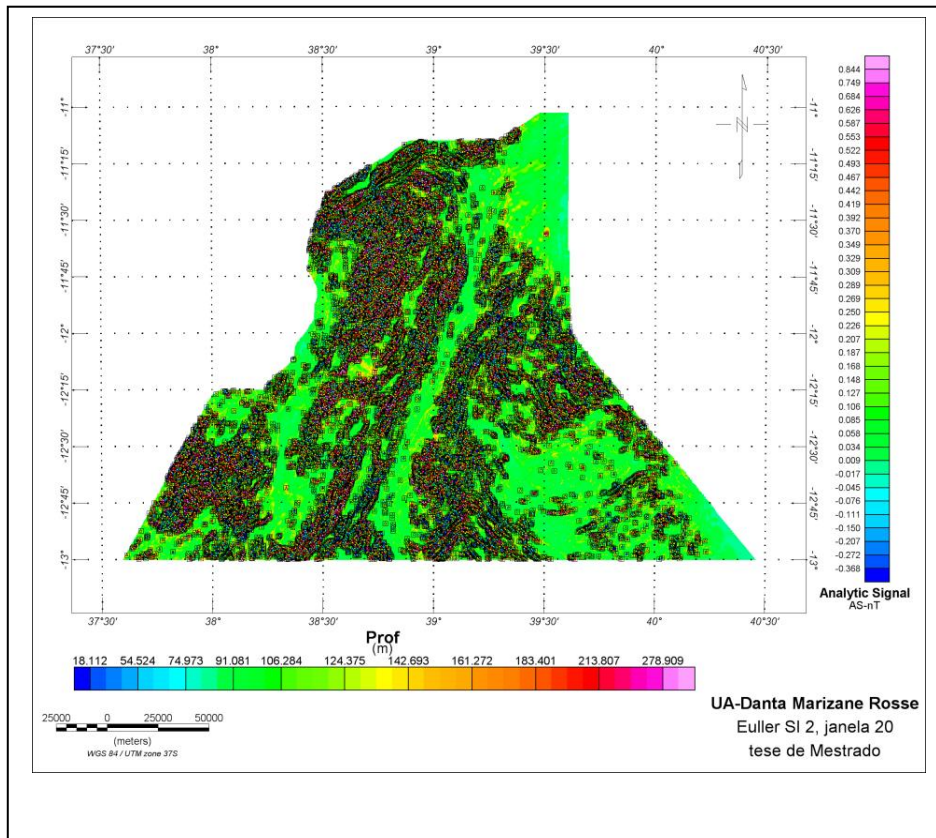
Uma outra opção é usar o *Euler3D*-> *Located Euler decon*. Para esse fim antes de tudo deve criar uma grelha do sinal analítico, indo a *Euler3D*-> *Located Euler decon*-> *Create and siplay analytic signal grid*.



Preenche a caixa de diálogo “*Calculate analytical signal*” como mostrado acima (informando quais são as grelhas das derivadas e qual será o nome da grelha de AS a ser criado), plote um novo mapa e clique em *Ok*. Será elaborado um mapa de sinal analítico. Caso deseje fazer uma filtragem na grelha, escolhendo as estruturas mais destacadas, para que sejam plotadas menos soluções, deve usar a opção: *Euler3D*-> *Located Euler decon*-> *Get grid peak locations*. Recomenda-se fazer uma avaliação na grelha de sinal analítico plotado no mapa para ver os valores das regiões mais “baixas” e das regiões mais “altas”. Esteja certo do valor mínimo (*cutoff*) abaixo do qual deseja cortar as localizações. Preenche a caixa de diálogo como desejar (leia o “*Help online*” para melhor compreensão dos parâmetros).

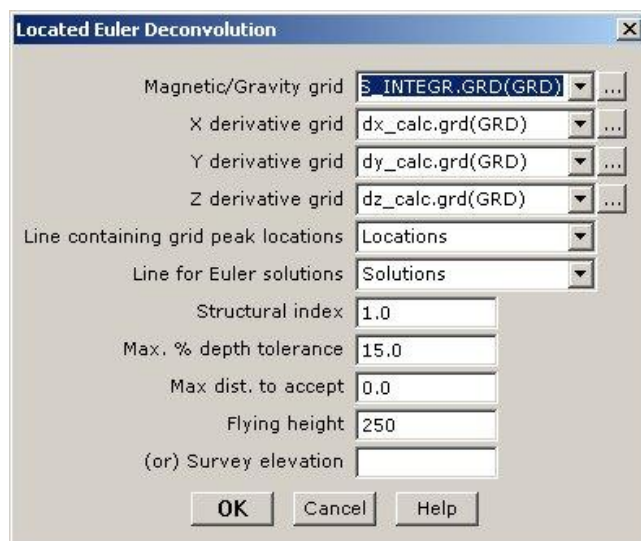


Será criado um *GDB* e nele haverá uma linha de nome “Locations” (nesta dissertação foi dada este nome para a referida linha) com as localizações depois da filtragem. Os símbolos com as novas localizações serão exibidos no mapa selecionado (o do sinal analítico).



Locations	X	Y	Grid value	WndSize	Mask
0.0	294500.00	6385500.00	0.05	2380.26	1
1.0	303500.00	6387500.00	0.04	1866.08	1
2.0	300000.00	6388000.00	0.04	1787.42	1
3.0	285000.00	6389000.00	0.11	1567.12	1
4.0	282000.00	6390500.00	0.09	1514.05	1
5.0	297500.00	6390500.00	0.05	1999.50	1
6.0	288000.00	6391000.00	0.04	2001.26	1
7.0	280500.00	6391500.00	0.05	2876.73	1
8.0	310500.00	6392000.00	0.04	2369.06	1
9.0	306500.00	6393000.00	0.05	1732.26	1
10.0	291000.00	6393500.00	0.12	3005.94	1
11.0	308500.00	6394000.00	0.05	1742.71	1
12.0	276000.00	6394500.00	0.65	1450.74	1
13.0	286000.00	6395500.00	0.23	2027.49	1
14.0	290500.00	6395500.00	0.13	1659.08	1
15.0	270500.00	6396000.00	0.28	2150.91	1
16.0	296000.00	6397000.00	0.20	1856.42	1
17.0	309500.00	6397000.00	0.05	1402.52	1
18.0	276500.00	6397500.00	1.46	1990.67	1
19.0	298000.00	6397500.00	0.16	2022.63	1
20.0	280000.00	6398000.00	2.90	1740.45	1
21.0	303000.00	6398500.00	0.17	1873.55	1
22.0	284000.00	6399000.00	0.62	1896.56	1
23.0	287500.00	6399000.00	0.93	1930.05	1
24.0	271000.00	6399500.00	0.15	1792.14	1
25.0	292000.00	6399500.00	0.57	1989.80	1
26.0	298500.00	6401000.00	0.18	1824.84	1
27.0	300500.00	6401000.00	0.18	1806.69	1
28.0	306500.00	6401000.00	0.67	1977.02	1

Novamente, para plotar as soluções usando o *Located Euler decon*, vá a *Euler3D-> Located Euler decon-> Located Euler decon*. A caixa abaixo será aberta:



Note que nessa caixa deve preencher os quatro primeiros campos com as grelhas já feitas. O campo “*Line containing grid peak locations*” deve ser preenchido com a linha do *GDB* onde guardou as localizações dos pontos escolhidos; o campo “*Line for Euler solutions*” deve ser preenchido com um nome que dará à linha onde as novas soluções serão guardadas. Assim como no *Standard Euler*, escolha o índice estrutural e os demais parâmetros e clique em *Ok*. Será criada uma nova linha “*Solutions*” no banco de dados (*GDB*). Nesta nova linha há uma série de novos canais na linha *Solutions*. Para exibí-los clique com o botão direito do mouse num canal vazio e escolha “*List*”. Neste caso irá encontrar menos soluções, mas os valores propostos para as profundidades das estruturas são os mais confiáveis.

Solutions	X	Y	Grid value	WndSize	Mask	Depth	Backgrnd	dXY	dZ	X Euler	X Offset
0.0	294500.00	6385500.00	0.05	2380.26	1	248.54	47.02	38.68	8.29	293809.91	690.09
1.0	303500.00	6387500.00	0.04	1866.08	1	113.08	59.05	93.11	11.69	303416.71	83.29
2.0	300000.00	6388000.00	0.04	1787.42	*	602.50	33.80	59.58	18.21	299951.18	48.82
3.0	285000.00	6389000.00	0.11	1567.12	1	211.94	38.91	22.59	7.87	284747.17	252.83
4.0	282000.00	6390500.00	0.09	1514.05	*	-30.37	27.95	159.04	36.71	281690.43	309.57
5.0	297500.00	6390500.00	0.05	1999.50	*	58.15	34.51	132.87	15.41	297386.32	113.68
6.0	288000.00	6391000.00	0.04	2001.26	1	487.18	26.94	57.19	13.55	287841.04	158.96
7.0	280500.00	6391500.00	0.05	2876.73	*	573.85	2.56	79.12	24.40	280708.81	-208.81
8.0	310500.00	6392000.00	0.04	2369.06	*	327.68	36.46	127.56	15.95	309952.56	547.44
9.0	306500.00	6393000.00	0.05	1732.26	*	192.51	20.10	118.02	54.56	306970.15	-470.15
10.0	291000.00	6393500.00	0.12	3005.94	*	7.45	19.05	240.15	52.29	290898.04	101.96
11.0	308500.00	6394000.00	0.05	1742.71	*	-64.77	12.82	183.05	32.29	308536.75	-36.75
12.0	276000.00	6394500.00	0.65	1450.74	1	142.78	-67.51	31.57	6.51	275795.51	204.49
13.0	286000.00	6395500.00	0.23	2027.49	1	219.87	10.70	61.54	12.60	285794.31	205.69
14.0	290500.00	6395500.00	0.13	1659.08	1	87.41	17.48	207.76	6.67	289396.36	1103.64
15.0	270500.00	6396000.00	0.28	2150.91	*	289.65	60.15	72.56	15.54	270660.74	-160.74
16.0	296000.00	6397000.00	0.20	1856.42	1	231.08	29.66	68.13	11.78	295834.12	165.88
17.0	309500.00	6397000.00	0.05	1402.52	*	8.11	9.27	147.23	22.98	309249.71	250.29
18.0	276500.00	6397500.00	1.46	1990.67	1	77.78	26.77	184.80	9.20	276684.70	-184.70
19.0	298000.00	6397500.00	0.16	2022.63	1	221.46	39.70	111.82	13.44	297859.16	140.84
20.0	280000.00	6398000.00	2.90	1740.45	1	80.27	148.87	58.27	7.82	280009.88	-90.88
21.0	303000.00	6398500.00	0.17	1873.55	1	221.46	17.75	119.04	11.01	303301.70	-301.70
22.0	284000.00	6399000.00	0.62	1896.56	1	162.03	15.59	83.30	9.50	283867.76	132.24
23.0	287500.00	6399000.00	0.93	1930.05	1	188.39	49.85	70.00	5.62	287081.58	418.42
24.0	271000.00	6399500.00	0.15	1792.14	1	99.42	91.58	62.66	13.91	271506.57	-506.57
25.0	292000.00	6399500.00	0.57	1989.80	1	208.65	59.62	77.10	7.33	291969.72	30.28
26.0	298500.00	6401000.00	0.18	1824.84	1	448.78	24.34	42.13	9.81	298766.09	-266.09
27.0	300500.00	6401000.00	0.18	1806.69	1	263.97	24.30	66.03	8.23	300412.99	87.01
28.0	306500.00	6401000.00	0.67	1977.02	1	162.73	24.75	78.16	10.39	306200.70	299.30

Para plotar as soluções, mantenha esse banco de dados (GDB) selecionado e vá a *Euler3D-> Plot solutions symbols-> Zone coloured*. O processo é semelhante ao que foi feito para plotar as soluções do *Standard Euler...* A caixa de diálogo que aparecerá é a que se segue abaixo. Deve escolher o canal “Depth” no banco de dados (GDB) onde estão as soluções do *Located Euler*, configurar os demais parâmetros e ao clicar em *Ok*, os símbolos serão plotados no mapa.

Colored symbols

Data channel

Depth

Mask channel

Zone file (ZON, ITR, AGG, or TBL)

8.tbl

Symbol

circle

Sizing preference

Fixed

Size of Fixed symbols (mm)

1.2

Proportioned symbol base

0

Proportioned scaling (units/mm)

1

Fill colour option

Variable fill colour

Fixed fill colour

None

Edge colour option

Fixed edge colour

Fixed edge colour

Edge font weight

light

OK

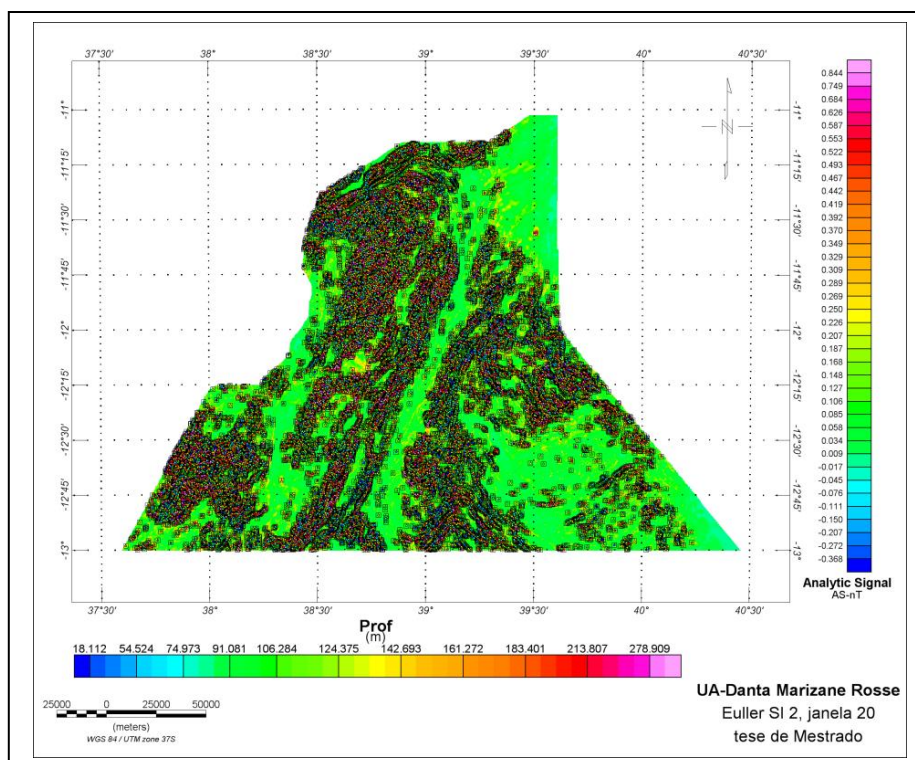
Cancel

Help

Aqui também pode plotar a barra de legenda de cores como citado anteriormente: vá a *Euler3D-> Plot solutions symbols-> Color legend bar*. A

caixa de diálogo a seguir será exibida. Escolhe no primeiro campo o grupo dos símbolos das soluções em profundidade, preenche os demais campos como desejar e usa o botão “*Locate*” para escolher no mapa onde deseja plotar a barra de cores. Depois clique em *Ok*.

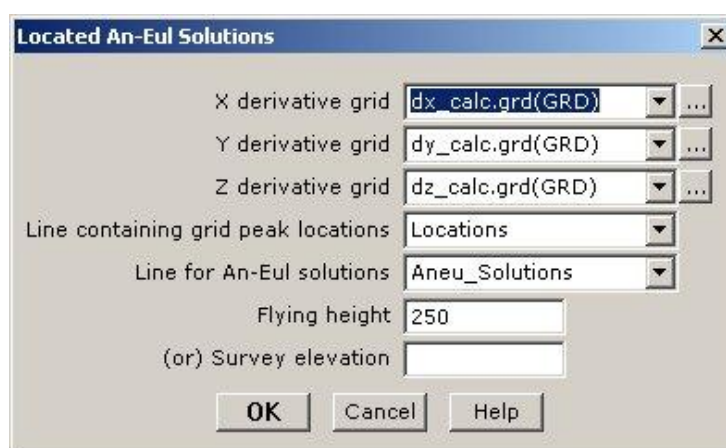
Terá um mapa semelhante ao que abaixo se segue:



A.4 – Procedimentos para a aplicação da Deconvolução Euler3D 3a opção

Utilizando o Euler3D

A terceira opção para estimar profundidades no *Oasis montaj*, usa-se os seguintes procedimentos: *Euler3D-> Located Euler decon-> Located An-Eul decon*. Com esta opção, além das profundidades, serão calculados os índices estruturais com base nos dados disponíveis nas grelhas. Recomenda que se duplique o banco de dados (*GDB*) que utilizou com as localizações e as soluções para o *Located Euler* a fim de usar as mesmas localizações no *An-Euler*. Ao seleccionar a opção *Euler3D-> Located Euler decon-> Located An-Eul decon* aparecerá a caixa de diálogo a seguir.



Preencher os três primeiros campos com as grelhas das derivadas, use “*Locations*” no quarto campo para o nome da linha, escolha o nome da linha que será criada para guardar as soluções do *An-Euler* e coloque a altura de voo ou elevação (conforme previamente explicado). Clique em *Ok*. Será criado um banco de dados (*GDB*) como o que abaixo se segue. Note que além de “*Depth*”, há também um canal com designação “*Index*”.

Aneu	Solut	X	Y	Grid value	WndSize	Mask	Depth	Index
0.0	294500.00	6385500.00		0.05	2380.26	1	398.10	0.72
1.0	303500.00	6387500.00		0.04	1866.08	*	*	*
2.0	300000.00	6388000.00		0.04	1787.42	*	*	*
3.0	285000.00	6389000.00		0.11	1567.12	1	550.70	1.82
4.0	282000.00	6390500.00		0.09	1514.05	*	*	*
5.0	297500.00	6390500.00		0.05	1999.50	*	*	*
6.0	288000.00	6391000.00		0.04	2001.26	*	*	*
7.0	280500.00	6391500.00		0.05	2876.73	1	617.27	0.36
8.0	310500.00	6392000.00		0.04	2369.06	1	1500.57	3.72
9.0	306500.00	6393000.00		0.05	1732.26	1	841.47	1.80
10.0	291000.00	6393500.00		0.12	3005.94	*	*	*
11.0	308500.00	6394000.00		0.05	1742.71	1	588.83	2.85
12.0	276000.00	6394500.00		0.65	1450.74	*	*	*
13.0	286000.00	6395500.00		0.23	2027.49	1	520.31	1.90
14.0	290500.00	6395500.00		0.13	1659.08	*	*	*
15.0	270500.00	6396000.00		0.28	2150.91	1	397.73	0.38
16.0	296000.00	6397000.00		0.20	1856.42	*	*	*
17.0	309500.00	6397000.00		0.05	1402.52	1	665.34	2.90
18.0	276500.00	6397500.00		1.46	1990.67	*	*	*
19.0	298000.00	6397500.00		0.16	2022.63	*	*	*
20.0	280000.00	6398000.00		2.90	1740.45	*	*	*
21.0	303000.00	6398500.00		0.17	1873.55	1	1000.73	2.18
22.0	284000.00	6399000.00		0.62	1896.56	1	559.12	1.86
23.0	287500.00	6399000.00		0.93	1930.05	1	941.94	3.83
24.0	271000.00	6399500.00		0.15	1792.14	*	*	*
25.0	292000.00	6399500.00		0.57	1989.80	1	485.52	2.07
26.0	298500.00	6401000.00		0.18	1824.84	1	910.09	2.28
27.0	300500.00	6401000.00		0.18	1806.69	1	495.14	1.77
28.0	306500.00	6401000.00		0.67	1977.02	1	828.18	3.77

Para plotar as soluções do An-Euler pode usar o mesmo tipo de mapa com a grelha do sinal analítico, conforme os procedimentos anteriores, com o *Aneu_ltd.gdb* selecionado, usa-se a opção *Euler3D-> Plot sions symbols-> Zone coloured*. Preencher a caixa de diálogo que se segue (usando o canal “Depth” da linha do banco de dados “*Aneu_solutions*”):

Colored symbols

Data channel:

Mask channel:

Zone file (ZON, ITR, AGG, or TBL): ...

Symbol:

Sizing preference:

Size of Fixed symbols (mm):

Proportioned symbol base:

Proportioned scaling (units/mm):

Fill colour option:

Fixed fill colour:

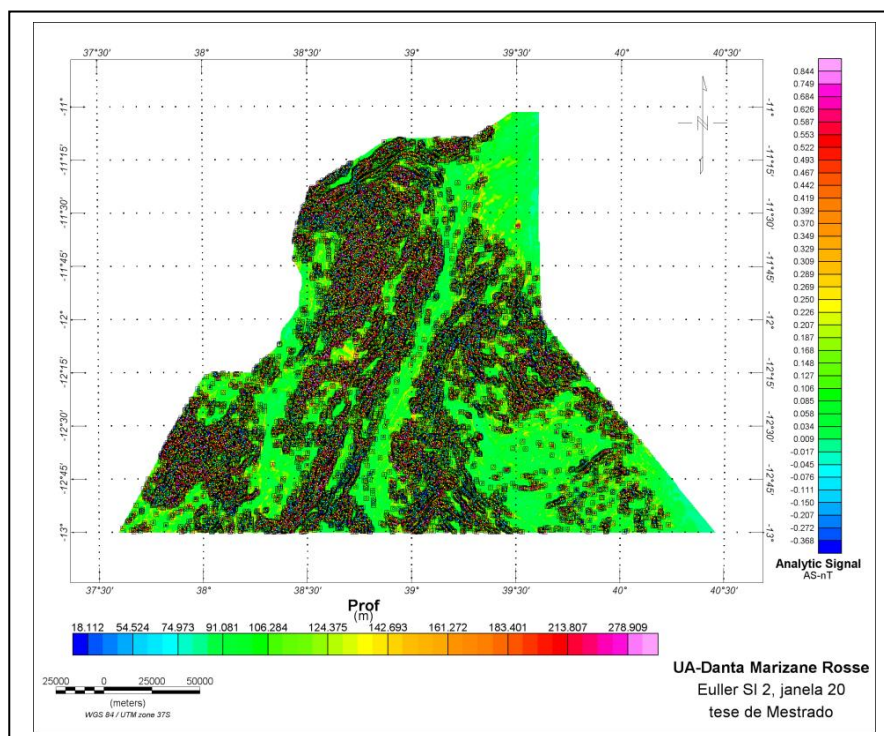
Edge colour option:

Fixed edge colour:

Edge font weight:

OK Cancel Help

Plota-se a barra de legenda da mesma maneira como foi explicado nas opções anteriores e obtém-se o mapa como o que se segue:



Há uma série de outras configurações possíveis de fazer, é possível realizar todos estes procedimentos com outros índices estruturais (neste anexo, foi usado o índice estrutural 2 em quase todos os cálculos) e quando se usa o *An-Euler*, também pode-se aplicar filtros aos índices estruturais que foram propostos.